BIOLOGÍA
Fabricar órganos humanos en animales

MEDICINA
Hacia la curación de la diabetes

LINGÜÍSTICA
La teoría de Chomsky se desmorona

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Enero 2017 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

LA GRAVEDAD CUÁNTICA A PRUEBA

¿Es posible medir los efectos cuánticos de la gravedad?

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

GRAVEDAD CUÁNTICA | LA TEORÍA DE CHOMSKY SE DESMORONA | HACIA LA CURACIÓN DE LA DIABETES

ENERO 2017 N.º 484



6,90 EUROS

ciclo de
conferencias y debates en

ciencias

9.ª edición

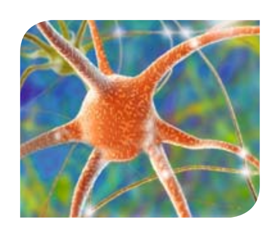
FUNDACIÓN RAMÓN ARECES

Por noveno año consecutivo, la Fundación Ramón Areces y Springer Nature, unidos con el objetivo de impulsar la divulgación científica, organizan conjuntamente un ciclo de conferencias y debates en ciencias, abordando cuestiones de actualidad y trasladando a la sociedad innovadores temas científicos y los avances más importantes en estas áreas, tratadas por grandes expertos internacionales.

Con esta iniciativa, la Fundación Ramón Areces y Springer Nature no intentan crear únicamente unas jornadas de debate científico o médico, sino generar una reflexión colectiva sobre materias, que en mayor o menor grado, afectan a toda la sociedad en un determinado periodo etario. De esta manera, se pretende presentar estos avances científicos, interpretándolos y traduciéndolos desde la perspectiva de los beneficios y las ventajas que pueden suponer para el bienestar y la calidad de vida de la sociedad, pero también desde sus posibles riesgos e inconvenientes, destacando e incidiendo en la importancia de la investigación en su progreso.

Enfermedades neurodegenerativas

EL RETO DEL SIGLO XXI



En un momento en el que nuestra sociedad cada vez goza de una mayor esperanza de vida, las enfermedades que afectan a la capacidad cognitiva, como la enfermedad de Alzheimer, el parkinson o la esclerosis lateral amiotrófica (ELA), están cada vez más presentes. Las enfermedades neurodegenerativas son un grupo muy diverso de trastornos que se caracterizan por el fallo progresivo de la función del sistema nervioso. En los últimos años se ha avanzado considerablemente en el conocimiento de las bases moleculares y celulares de estas enfermedades, y en la búsqueda de nuevas dianas así como de biomarcadores que permitan un diagnóstico temprano; sin embargo, estas enfermedades continúan siendo un gran reto para investigadores y clínicos. Los retos que plantea el estudio de estas enfermedades a nivel preclínico, la importancia de enfocar la investigación en el marco del paciente así como las barreras para trasladar nuevos avances al ámbito clínico son importantes para que la sociedad apoye la investigación en este campo y se mantenga informada sobre el futuro de las terapias dirigidas a los pacientes con enfermedades neurodegenerativas.

FUNDACIÓN RAMÓN ARECES
SPRINGER NATURE



INFORMACIÓN E INSCRIPCIONES
www.fundacionareces.es
C/ Vitruvio, 5 • 28006 Madrid
Metro: República Argentina / Gregorio Marañón
91 515 89 80
Fecha de inscripción:
hasta el 6 de febrero de 2017

Intervenciones

Moderadora
Erika Pastrana
Editora-Jefa de sección. Nature Communications, Nueva York, EE. UU.

Mecanismos patológicos de las enfermedades neurodegenerativas. Énfasis en ELA
Prof. Jeffrey D. Rothstein
Director, Brain Science Institute and Robert Packard Center for ALS Research, Facultad de Medicina, Johns Hopkins University, Baltimore, EE. UU.

Retos y avances en el tratamiento de la enfermedad de Parkinson
Dr. José A. Obeso
HM Hospitales, Centre for Integrative Neuroscience A.C. Centro de Investigación Biomédica en red de Enfermedades Neurodegenerativas, Instituto Carlos III, Madrid, España

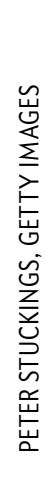
Disfunción de los circuitos neuronales en la enfermedad de Alzheimer
Prof. Dr. Arthur Konnerth
Instituto de Neurociencia de Technische Universität München. Cluster for Systems Neurology (SyNergy). Múnich, Alemania

Enfermedad de Alzheimer - De la patología cerebral a las estrategias de tratamiento
Dr. Christian Haass
Universidad Ludwig Maximilian de Múnich. Centro Alemán de Enfermedades Neurodegenerativas. Múnich, Alemania

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Enero 2017, Número 484

42

ARTÍCULOS


PETER STUCKINGS, GETTY IMAGES



7



50



88

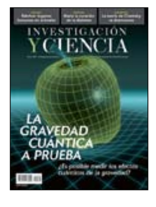
INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES



EN PORTADA

Hace décadas que la investigación en gravedad cuántica, el «santo grial» de la física teórica, se ha visto circunscrita al ámbito puramente matemático debido a la imposibilidad técnica de llevar a cabo los experimentos necesarios. Esa situación podría cambiar dentro de poco. Varios avances recientes en astronomía y nanotecnología están abriendo nuevas vías para conectar empíricamente el mundo cuántico con los fenómenos gravitatorios. Ilustración de *Investigación y Ciencia*.



redaccion@investigacionyciencia.es

PECES INTELIGENTES

En «Los genios del mar» [Investigación y Ciencia, agosto de 2016], Jonathan Balcombe habla de «uso de herramientas» para describir el comportamiento de algunos peces que se valen de objetos para llevar a cabo ciertas tareas. Aun reconociendo que se trata de una conducta sorprendente, el empleo del término *herramienta* puede llevar a confusión. En los humanos, el uso de herramientas implica concebir una imagen mental de la situación inicial, otra del resultado que se desea obtener, así como un plan que lleve de la primera al segundo. El hecho de que los animales utilicen «herramientas» no debería confundirse con las facultades mencionadas.

William L. Abler
Arcata, California

Responde Balcombe: *El empleo de herramientas por parte de algunos peces podría no diferenciarse tanto del comportamiento humano como cree el lector. La capacidad de estos animales para comunicarse por medio de señales referenciales y para ejecutar tareas secuenciales de manera flexible apoya fuertemente la idea de que pueden hacer planes; además, su facultad para recordar y crear mapas mentales implica una cierta capacidad de evocar imágenes mentales.*

VIDEOJUEGOS E INTELIGENCIA

A la hora de investigar con personas, es fundamental seleccionar un buen grupo de control. En «Videojuegos que potencian el cerebro» [Investigación y Ciencia, septiembre de 2016], Daphne Bavelier y C. Shawn Green refieren haber comparado los efectos de su terapia, consistente en participar en videojuegos de acción, con los de un grupo de jugadores que tomaron parte en «juegos sociales». Si esas son las únicas dos opciones, sus resultados son triviales.

¿Por qué no comparar jugar a videojuegos con invertir el mismo tiempo en actividades como practicar tenis, construir un fuerte, hacer la cena o incluso leer un libro? No pongo en duda que los videojuegos mejoren algunas facultades cognitivas. El problema es que parecen estar suplantando a todas las actividades infantiles. En este sentido, comparar los efectos de un videojuego con los de otro no parece una ciencia muy útil, aunque sin duda hará muy felices a los directivos de algunas corporaciones.

Lake McClenney
Fallbrook, California

¿MEJOR CON DOS PIERNAS?

Al leer el artículo de John Pavlus «Metal bípedo» [Investigación y Ciencia, octubre de 2016], no alcanzo a entender por qué un robot debería tener dos piernas (aparte de su posible aplicación a la fabricación de prótesis para humanos). Todo parece indicar que una máquina con tres o cuatro piernas sería mucho más estable y hábil a la hora de vérselas con el terreno. Tampoco hay razón por la cual no podrían tener un solo brazo, por ejemplo. ¿Estamos siguiendo las pautas marcadas por la ciencia ficción, donde suele darse por sentado que una criatura alienígena debería poseer un cuerpo humanoide?

Michael I. Sobel
Profesor emérito de física
Escuela Universitaria de Brooklyn

Responde Pavlus: *Según los investigadores a quienes entrevisté para el artículo, una de las mayores razones para diseñar robots «antropomorfos» y bípedos es optimizar su agilidad y versatilidad en entornos construidos por humanos. Tales entornos han sido diseñados para facilitar la movilidad de un cuerpo con dos brazos y dos piernas; por lo que, en un caso ideal, un robot con características similares debería poder explotar dichas ventajas. Una máquina con tres piernas y un brazo podría tener dificultades para moverse con eficiencia en esos ambientes.*

Varios de los equipos que participaron en el Desafío Robótico DARPA de 2015 diseñaron robots de altas prestaciones que no eran bípedos. Sin embargo, los investigadores consideran que un robot con dos piernas debería ser capaz de llevar a cabo todas las tareas que logran esas máquinas extrañas, pero también muchas más.



Agosto, septiembre y octubre 2016

Errata corrige

En la sección **Hace 50, 100 y 150 años** del número de octubre de 2016 se indica erróneamente que los extractos pertenecen al mes de noviembre. Todos ellos corresponden a los meses de octubre de 1966, 1916 y 1866.

Como señala nuestro lector Lambert en relación al último párrafo del artículo de Bartolo Luque **El problema del cumpleaños y la seguridad de nuestras contraseñas** [Juegos Matemáticos; Investigación y Ciencia, noviembre de 2016], no es necesario que el pirata informático obtenga nuestra contraseña para entrar con nuestra identidad en la base de datos. En realidad, le bastaría con encontrar cualquier contraseña de las muchas que producen el mismo hash.

Estos errores han sido corregidos en la edición digital de los artículos correspondientes

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

ARQUEOLOGÍA

¿De quién son estas herramientas?

Algunos monos son capaces de obtener lascas de piedra sorprendentemente similares a los útiles líticos de nuestros antepasados humanos

Un mono toma una piedra del tamaño de una patata con sus diminutas manos, la levanta por encima de su cabeza y la baja con todas sus fuerzas para machacarla contra otra clavada en el suelo. Mientras el entusiasmado animal sigue y sigue, del canto que empuña salen varias esquirlas volando. Son lo bastante afiladas para cortar carne o plantas, pero el simio no les presta mucha atención, salvo para poner una de ellas sobre la piedra clavada en el suelo e intentar machacarla también. Sin quererlo, ha producido lascas que cualquiera confundiría con las herramientas de un yacimiento humano.

El mono es un capuchino salvaje del Parque Nacional de Serra da Capivara, en el noreste de Brasil. Hace tiempo que se sabe que estos simios usan piedras para todo tipo de actividades, desde cascar frutos secos y escarbar en busca de raíces hasta atraer la atención de posibles parejas. Otros primates no humanos, como los chimpancés de África occidental, también emplean piedras a modo de herramienta, si bien los capuchinos de Capivara son los únicos a los que se les ha visto percutir unas contra otras para romperlas, una actividad que hasta ahora se consideraba exclusiva de nuestro linaje. Nuestros antepasados lo hacían para fabricar útiles afilados que les permitiesen cortar. A los capuchinos, en cambio, nadie les ha visto usar las lascas que obtienen; como mucho, lamen la piedra clavada en el suelo, tal vez para buscar polvo mineral.

Un trabajo reciente sobre las esquirlas que producen estos animales ha encontrado que esas pequeñas creaciones de piedra satisfacen todos los criterios diagnósticos que se suelen emplear para distinguir las herramientas humanas de las piedras rotas por causas naturales. El hallazgo, publicado en otoño de 2016 en *Nature*, podría avivar el debate sobre la verdadera naturaleza de algunos yacimientos controvertidos. También suscita dudas sobre qué nos diferencia de otros primates y sobre cómo empezaron

THOMAS PITILLI



Las lascas obtenidas por capuchinos salvajes al golpear unas piedras contra otras (*abajo*) presentan las mismas características que algunas herramientas de piedra fabricadas por nuestros antepasados.

nuestros ancestros a fabricar herramientas líticas.

Tomos Proffitt, de la Universidad de Oxford, y sus colaboradores observaron que los capuchinos elegían ciertas piedras para usarlas como martillo y golpearlas contra otras. Después, recogieron los fragmentos que hallaron al efectuar excavaciones en la zona —tal y como habrían hecho si se tratase de un yacimiento humano— y, tras juntar 111 de estos objetos, analizaron su forma, tamaño y el tipo de marcas que habían dejado los golpes.

Para su sorpresa, hallaron que las piezas obtenidas por los capuchinos presentaban una forma típica de cuchara, o «concoidea», así como unos bordes cortantes muy afilados; también vieron que los simios extraían a menudo múltiples esquirlas de una sola piedra: todos ellos constituyen rasgos típicos de las herramientas de factura humana. (Los autores explican que los fragmentos producidos por los chimpancés cuando rompen cáscaras de nuez no cumplen la mayoría de los criterios diagnósticos, como tampoco lo hacen las esquirlas creadas por bonobos en cautividad a quienes se les ha enseñado a hacer lascas.)

En el pasado, los expertos han asociado tales características a la aparición de unas manos y una coordinación similares a las humanas, así como a ciertos cambios cognitivos [*véase* «¿Cómo nos cambió la fabricación de herramientas?», por Dietrich Stout; Investigación y Ciencia, junio de 2016]. Sin embargo, el hecho de que los monos fabriquen piezas con las mismas propiedades exige una explicación evolutiva diferente. Y, dado que pueden hacerlo los monos modernos, cabe preguntarse si, en el pasado, otros simios hoy extintos pudieron haber dejado sus propios yacimientos. Proffitt y sus colaboradores sostienen que, a partir de ahora, los expertos tendrán que refinar sus criterios de evaluación a la hora de identificar los utensilios de piedra fabricados intencionadamente por nuestros ancestros humanos.

«Muchos se van a sentir incómodos con el hecho de que también los capuchinos sean capaces de crear estas herramientas», opina Sonia Harmand, arqueóloga de Stony Brook que no participó en la investigación. Según ella, las piezas obtenidas por los monos no parecerían fuera de lugar en los yacimientos de África oriental donde se han encontrado restos de una de las primeras industrias líticas humanas: la olduvayense, cuyos ejemplares más antiguos, hallados en el yacimiento de Gona, en Etiopía, se remontan a hace 2,6 millones de años. Las lascas de los capuchinos solo se asemejan a los útiles olduvayenses más simples; otros, explica Harmand, exhiben bastante más depuración y planificación. Las creaciones de estos monos también se diferencian de las herramientas de piedra más antiguas que se conocen: los útiles de 3,3 millones de años que Harmand y su equipo extrajeron del yacimiento de Lomekwi, en Kenia. Estas son mucho mayores y se encuentran hechas de basalto y fonolita, rocas más densas que el cuarzo y las cuarcitas que usan los capuchinos.

Algunos expertos se preguntan si las esquirlas de estos animales no acabarán arrojando dudas sobre si verdaderamente fueron nuestros antepasados quienes fabricaron los útiles líticos más antiguos que se conocen. Aunque se han atribuido al linaje humano, los yacimientos correspondientes carecen de fósiles que permitan establecer esa conexión. «No tenemos ni idea», opina Wil Roebroeks, arqueólogo de la Universidad de Leiden, sobre la autoría del material hallado en Lomekwi y Gona.

Hélène Roche, de la Universidad de París Oeste Nanterre La Défense, discrepa de ese juicio: en un comentario que acompaña al artículo de *Nature*, la experta afirma que los resultados no deberían suscitar dudas sobre quién fabricó las herramientas líticas más antiguas de África. Argumenta que se han estudiado cientos de esos yacimientos y que en muchos de ellos se han encontrado indicios contextuales: huesos con marcas de corte que indican la manera en que se usaban las herramientas, así como fósiles que revelan que fueron fabricados por antepasados humanos.

Harmand añade que, por más que el estudio sobre los capuchinos haya demostrado que algunas especies no humanas pueden producir accidentalmente fragmentos de piedra similares a las herramientas cortantes de nuestros ancestros, eso no significa que estas últimas no sean especiales. Aun cuando nuestros antepasados también hubiesen comenzado a producirlas de manera involuntaria, antes o después algo les hizo percatarse de que podían darles un uso y fabricar otros útiles adaptados a sus propósitos. Además, la técnica humana evolucionó desde las herramientas simples halladas en Lomekwi y en los yacimientos olduvayenses hasta las bifaces de bordes cuidadosamente tallados de un millón de años después, para, por último, convertirse en nuestra compleja maquinaria actual. ¿Por qué no ocurrió lo mismo con los chimpancés o los capuchinos?, se pregunta Harmand. ¿Por qué solo los seres humanos hemos llegado tan lejos?

Ahora Proffitt espera averiguar cuánto tiempo llevan los capuchinos usando rocas de esa forma. Otros indicios apuntan a que estos simios han estado empleando guijarros para romper cáscaras de frutos secos desde hace al menos 600 años. Por su parte, las piedras utilizadas por los chimpancés de Costa de Marfil se remontan a hace 4300 años. Harmand observa que, más allá de eso, no existen pruebas sobre qué hacían los monos o los grandes simios en el pasado... algo que sin duda deja un amplio margen para sorpresas en el futuro.

—*Kate Wong*

DE: «WILD MONKEYS FLAKE STONE TOOLS», M. HASLAM ET AL. EN *NATURE*, VOL. 539, 19 DE OCTUBRE, 2016

SALUD

¿Podrá una dieta especial sustituir a la quimioterapia?

Para los pacientes con leucemia o que precisan un trasplante de médula ósea, el aminoácido valina podría ser la respuesta a nuevos tratamientos

Cada año decenas de miles de personas reciben un trasplante de médula ósea (*imagen*) o de sangre de cordón umbilical.

Los tratamientos contra la leucemia podrían incluir algún día restricciones alimenticias especiales: se ha descubierto que uno de los aminoácidos esenciales desempeña un cometido crucial en la creación de las células madre de la sangre, hallazgo que en opinión de los expertos podría conducir en el futuro a una alternativa a la quimioterapia y la radioterapia.

La valina es uno de los diez aminoácidos esenciales, constituyentes básicos de las proteínas que son imprescindibles para la vida pero que el cuerpo humano no es capaz de sintetizar, por lo que es preciso obtenerlos a través de la dieta; abundan en los alimentos ricos en proteínas como la carne, los lácteos y las legumbres. Agente activo en el metabolismo y la reparación de los tejidos, la valina parece ahora capital para la formación de las células madre sanguíneas. Investigadores de la Universidad de Tokio y la Universidad Stanford han descrito en *Science* que las células madre de la sangre humana no proliferan si se las cultiva en placas de Petri sin valina. Los ratones que permanecen privados de ella entre dos y cuatro semanas también dejan de fabricar glóbulos rojos y blancos.

A la luz de tales resultados, el autor Hiromitsu Nakauchi y sus colaboradores creen que privar a los pacientes leucémicos de la valina de origen alimentario antes de recibir el trasplante medular podría evitarles la quimio o la radioterapia, tratamientos que si bien destruyen las células madre sanguíneas causantes del cáncer para dejar paso libre a las células trasplantadas acarrean riesgos para la salud. Estos científicos sometieron la idea a examen mediante un experimento de seguimiento con ratones a los que privaron de la valina y culminaron con éxito el trasplante medular sin radiación ni quimioterapia. Aun así, la mitad de los roedores falleció, a causa de la carencia de valina, poco después de acabar el ensayo de cuatro semanas.

Nakauchi aclara que serán precisos años de estudios antes de averiguar cuánto tiempo puede el hombre tolerar una dieta carente del aminoácido (que seguramente se suministraría por vía endovenosa). Pero si la privación de valina funciona en los humanos, podría abrir la puerta del trasplante medular a pacientes que normalmente son descartados como candidatos a la quimioterapia o la radiación (embarazadas o personas con cifras bajas en los hemogramas), asegura Linheng Li, experto en células madre del Instituto Stowers de Investigación Médica de Kansas City, Misuri, ajeno al estudio. Li sospecha que esta estrategia no será eficaz por sí sola como oncoterapia, pero sí tal vez combinada con otros tratamientos o con dosis pequeñas de quimio y radioterapia. La eliminación de la valina de la dieta de ciertos pacientes con leucemia tal vez podría acabar con las células causantes de ese tipo de neoplasias malignas, opina Nakauchi. «Sería magnífico que un tratamiento tan sencillo y relativamente inocuo sirviera para combatir la leucemia.» —*Karen Weintraub*

ETOLOGÍA

El notable cronómetro de las focas

Algunos mamíferos marinos son capaces de distinguir períodos de tiempo de milisegundos de diferencia

Muchos animales siguen rutinas diarias o ciclos estacionales, pero ¿pueden distinguir, digamos, 3 segundos de 13? Algunos (abejorros, palomas o gatos, entre otros) perciben el paso del tiempo con cierta precisión. Tras años de dedicación al estudio de las focas criadas en cautividad en el Centro de Ciencias Marinas de la Universidad de Rostock, el biólogo Frederike D. Hanke sospechó que estos mamíferos también podrían estar capacitados para ello.

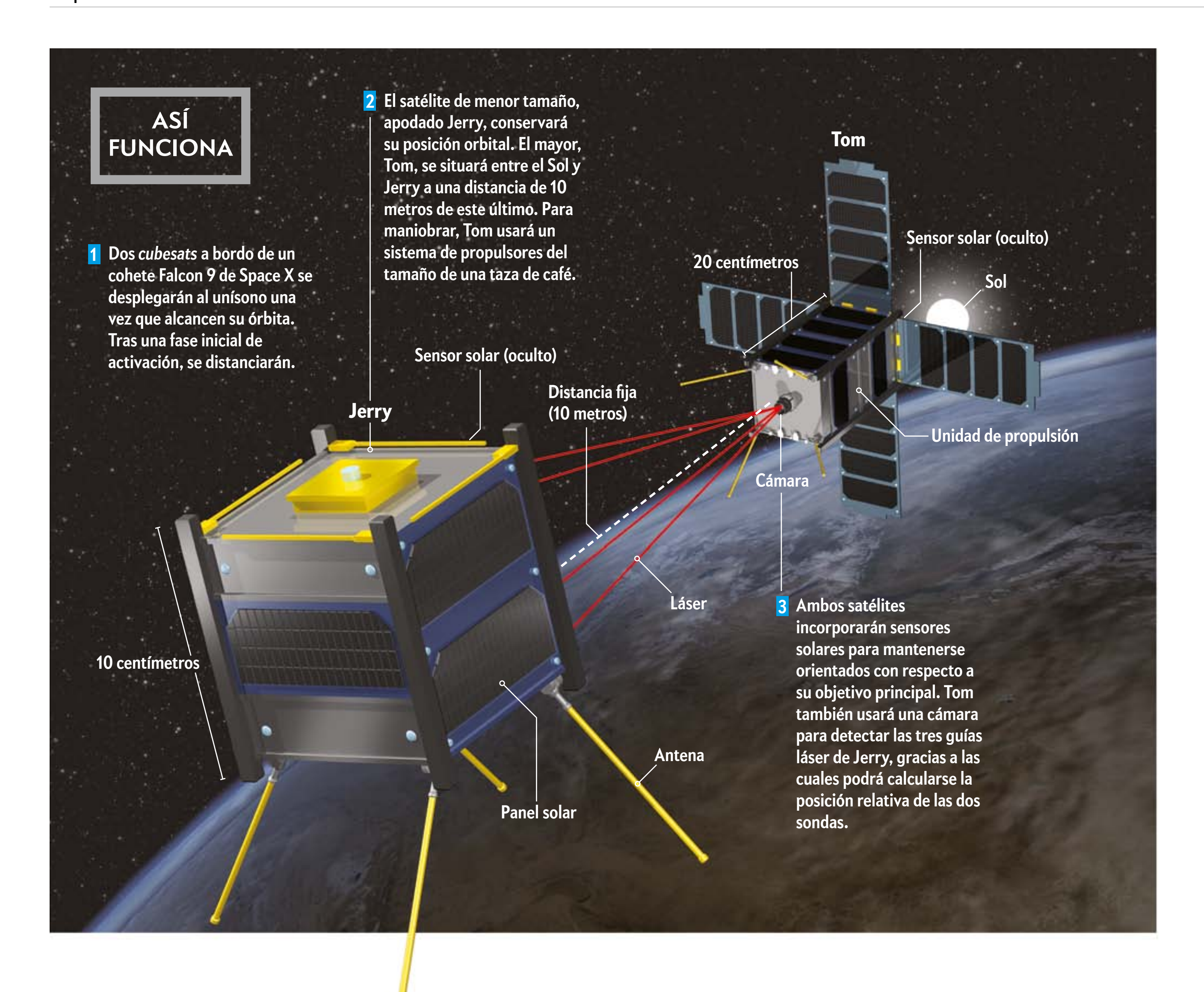
Hanke y su equipo pusieron a prueba su corazonada con Luca, una foca común macho de once años que vive en el centro. Le mostraban un círculo blanco sobre una pantalla de ordenador negra durante períodos de entre 3 y 30 segundos, imagen a la que seguía una pausa antes de que el círculo reapareciese por breve tiempo. Adiestraron a Luca para que pulsara un botón si creía que la segunda aparición era más larga y una segunda vez si pensaba que tenía la misma duración que la primera. Si acertaba, recibía como premio un sabroso arenque.

Descubrieron así que el animal era capaz de apreciar diferencias de tan solo 420 milisegundos. En otras palabras: podía distinguir entre una exposición de 3 segundos exactos y otra de 3,42 segundos. No obstante, su precisión flaqueaba conforme la duración de los pares de exposiciones aumentaba. Los resultados del experimento se han publicado en *Animal Cognition* (es la primera vez que se describe la capacidad para medir el tiempo en un pinnípedo).

Es posible que las focas hayan adquirido tal aptitud con el fin de tomar decisiones en fracciones de segundo mientras persiguen a los peces o para reconocer las vocalizaciones emitidas con diferentes frecuencias por otras congéneres, afirma Hanke, que ha ampliado su investigación a otras especies de focas y a los estímulos acústicos. Peter Cook, psicólogo del New College de Florida que ha estudiado la cognición en los pinnípedos y que es ajeno al estudio, le ha impresionado la rapidez con la que Luca aprendió a ejecutar la tarea. En experimentos psicofísicos como este es habitual que los animales precisen muchas horas de práctica, pero Luca la dominó en solo dos sesiones de adiestramiento. «Estamos hablando de discriminaciones sumamente pequeñas y esas breves duraciones dicen mucho a favor de la foca. Indica a las claras que se trata de un sentido agudo y refinado.»

—*Jason G. Goldman*

STEVE GSCHMEISSNER, SCIENCE SOURCE (*aguja*); THOMAS FUCHS (*foca*)



ESPACIO

Llegan los telescopios virtuales

La NASA explorará cómo construir un gigantesco telescopio espacial a partir de dos pequeños satélites en órbita

Más de cuatro siglos después de que Galileo fabricase su primer catalejo, la NASA y la Universidad Yonsei, en Corea del Sur, intentarán construir un «telescopio virtual» a partir de dos sondas espaciales independientes. Para poner a prueba el concepto, los científicos han fabricado dos pequeños satélites cúbicos, o *cubesats*, cuyas órbitas intentarán alinear con el objetivo último de componer un telescopio cuya longitud focal sea igual a la distancia que separa las naves. La misión, cuyo lanzamiento está previsto para principios de 2017 y que tiene un coste aproximado de un millón de dólares, allanará el camino hacia un nuevo tipo de instrumento que permitirá estudiar el Sol o exoplanetas lejanos sin necesidad de un lanzar un telescopio enorme y mucho más pesado.

El proyecto, bautizado como «Astronomía con Cubesats de la NASA y Yonsei para un Experimento de Alineamiento de Telescopio Virtual», cuyo acrónimo en inglés es CANYVAL-X, tendrá una duración de seis meses. Usará dos sondas espaciales con el tamaño conjunto de una hogaza de pan de molde, las cuales orbitarán apuntando en línea recta hacia su objetivo. «Coordinar dos sondas espaciales, alinearlas con respecto a una fuente lejana y mantener dicha configuración es algo que no se ha intentado antes», explica Neerav Shah, ingeniero aeroespacial en el Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA.

Los telescopios virtuales podrían resultar muy útiles, ya que los componentes que normalmente suelen estar alojados en un mismo instrumento volarán por separado, lo que según Shah supondría una ventaja para ciertas misiones. Por ejemplo, un instrumento emplazado en uno de los satélites podría bloquear el resplandor del Sol o de una estrella lejana, lo que permitiría que una cámara alojada en el otro fotografiase fenómenos sutiles, como la fantasmal corona solar o un exoplaneta en torno a su estrella. Otros telescopios diseñados para detectar radiación de alta energía, como los rayos X, exigen una considerable distancia entre los espejos y los detectores, por lo que suelen ser instrumentos de gran tamaño, lo que implica grandes costes de construcción y de lanzamiento.

El objetivo de CANYVAL-X no es transportar todos los componentes necesarios para el funcionamiento de un telescopio, sino demostrar la viabilidad de la técnica. En 2019, una misión de 100 millones de euros de la Agencia Espacial Europea, Proba-3, pondrá en órbita un telescopio virtual completamente operativo para estudiar el Sol.

—Jeremy Hsu

DON FOLEY

BIOLOGÍA

Vegetales con visión

¿Tienen las plantas la facultad de ver?

Disimule, pero diría que ese árbol le está mirando. Varias líneas de investigación recientes sugieren que las plantas tienen la facultad de la visión y que hasta podrían poseer una suerte de ojo, sumamente sencillo, eso sí.

La idea de que las plantas puedan tener «ojos» no es nueva en absoluto. En 1907, Francis Darwin, hijo del célebre Charles, planteó la hipótesis de que las hojas poseían unos órganos, ahora llamados ocelos, que son una combinación de células lenticulares y células fotosensibles. Los experimentos a inicios del siglo xx confirmaron aparentemente la existencia de tales estructuras, pero el concepto de «planta vidente» cayó en el olvido, hasta hace pocos años, en que parece haber resurgido.



THOMAS FUCHS (*ilustración*); IL·LUSTRACIÈNCIA/JAIME DE LA TORRE NAHARRO (*Cordyceps unilateralis*)

En uno de los últimos números de *Trends in Plant Science*, František Baluška, experto en biología celular vegetal de la Universidad de Bonn, y Stefano Mancuso, fisiólogo vegetal de la Universidad de Florencia, exponen nuevos indicios sobre vegetales con capacidad visual. Para defender sus argumentos, los investigadores señalan en primer lugar el descubrimiento en 2016 de que las cianobacterias *Synechocystis*, microorganismos unicelulares que realizan la fotosíntesis, actúan a modo de ocelos. «Estas cianobacterias se sirven de la célula entera como lente para enfocar una imagen de la fuente luminosa en la membrana celular, como si se tratara de la retina del ojo animal», explica Conrad Mullineaux, microbiólogo de la Universidad de Londres y autor del descubrimiento. Nadie está seguro de la finalidad de tal mecanismo, pero su existencia induce a pensar en que algo similar pueda existir en las plantas superiores. «Si en el escalón más bajo de la evolución ya existe algo así, seguramente se habrá conservado», asegura Baluška.

Según trabajos recientes, ciertas plantas como la col y *Arabidopsis*, pariente de la mostaza, fabrican proteínas implicadas en el desarrollo y el funcionamiento de los ocelos, los rudimentarios ojos de las algas verdes. Estas proteínas se concentran en los plastoglóbulos, estructuras conocidas por otorgar a las hojas otoñales sus tonos ocres y rojizos. «Ello sugiere que los plastoglóbulos vegetales podrían actuar como ocelos», afirma Baluška.

Otros estudios observacionales insinúan que las plantas poseen facultades visuales que aún no entendemos. Por ejemplo, en 2014 se describió que la enredadera leñosa *Boquila trifoliolata* es capaz de modificar el color y la forma de sus hojas para imitar a la anfitriona que le sirve de sostén.

Si bien los indicios de estructuras pseudooculares en las plantas superiores son escasos, no cesan de surgir. «Jamás había oído hablar de la visión vegetal y no hubiera creído en ella de no ser por mi descubrimiento de que las cianobacterias operan como el ocular de una cámara», confiesa el biotecnólogo Nils Schuergers, uno de los artífices del estudio de 2016 sobre *Synechocystis*. El próximo paso será confirmar los experimentos que hace más de un siglo revelaron que las propias células vegetales pueden actuar a modo de lentes, y aún habrá que averiguar a qué fines sirve la visión rudimentaria de las plantas.

—*Marta Zaraska*

AGENDA

CONFERENCIAS

20 de enero
Reprogramación celular: Su impacto actual y futuro en nuestra sociedad
José Cibelli, Centro Andaluz de Nanomedicina y Biotecnología
Ámbito Cultural El Corte Inglés
Málaga
www.encuentrosconlaciencia.es

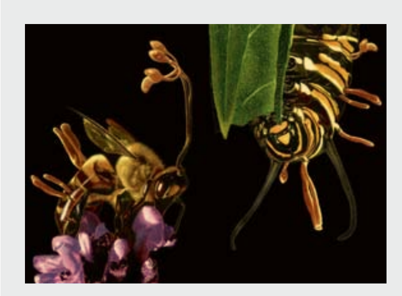
20 de enero
Neuromagia: El cerebro mágico
Luis Martínez Otero, Instituto de Neurociencias de Alicante
Ateneo de Mahón
Mahón
www.ciudadciencia.es > agenda

24 de enero
Energías renovables del futuro: Fotovoltaica y fuel solar
Juan Bisquert, Universidad Jaime I
Ciudad de las Artes y las Ciencias
Valencia
www.cac.es/comunitatambciencia

EXPOSICIONES

De Excalibur a los agujeros negros
Exposición sobre la física de la gravedad
Museo de la Evolución Humana
Burgos
www.museoevolucionhumana.com

Illustraciencia
Museo Nacional de Ciencia y Tecnología
La Coruña
www.muncyt.es > exposiciones



Los hidrocarburos en nuestra vida diaria
Museo Geominero
Madrid
www.igme.es > divulgación

OTROS

Científico Cassini por un día
Concurso de astronomía para estudiantes de primaria, ESO y bachillerato
Agencia Espacial Europea y Parque de las Ciencias de Granada
www.parqueciencias.com > actividades

SALUD

El sobrediagnóstico en medicina

Están surgiendo varias iniciativas que pretenden evitar la excesiva intervención a la hora de detectar, curar o paliar enfermedades

CARI ALMAZÁN, JOAN M. V. PONS Y TONI DEDEU

Cuando sentimos molestias o caemos enfermos, acudimos al médico en busca de una solución. Ante la necesidad de atención y curación de nuestras dolencias, tendemos a calificar la asistencia en función del número de pruebas que se nos solicita o la cantidad de recetas con la que abandonamos la consulta. Por otro lado, convivimos con mensajes publicitarios que nos alertan sobre enfermedades que podríamos padecer en el futuro. Para anticiparnos al riesgo de sufrir estas patologías, se nos invita a hacernos pruebas de diagnóstico precoz. Asimismo, antiguos o nuevos trastornos se convierten en enfermedades para las que surgen nuevos fármacos y tratamientos.

Como consecuencia de estos y otros factores, parecemos dirigirnos a una sociedad donde el número excesivo de pruebas y tratamientos podría causar más perjuicios que beneficios en términos de salud y de utilización de los recursos de los sistemas sanitarios. Para frenar esta tendencia, cada vez más los profesionales de la sanidad —e incluso de otras disciplinas, como la sociología o la economía— advierten sobre los problemas que de ella se derivan y reclaman la aplicación de una mayor racionalidad en la toma de decisiones.

¿Qué se entiende por sobrediagnóstico?

El término se conoce desde hace varias décadas, pero durante los últimos años su estudio y debate están cobrando auge. Se trata de un concepto todavía ambivalente que puede tener diversas interpretaciones. En su versión más aceptada, corresponde a la detección de una enfermedad que no ocasionará síntomas a lo largo de la vida de una persona, ni tampoco su fallecimiento, y cuyo tratamiento no aportará ningún beneficio; al contrario, provocará daños y costes.

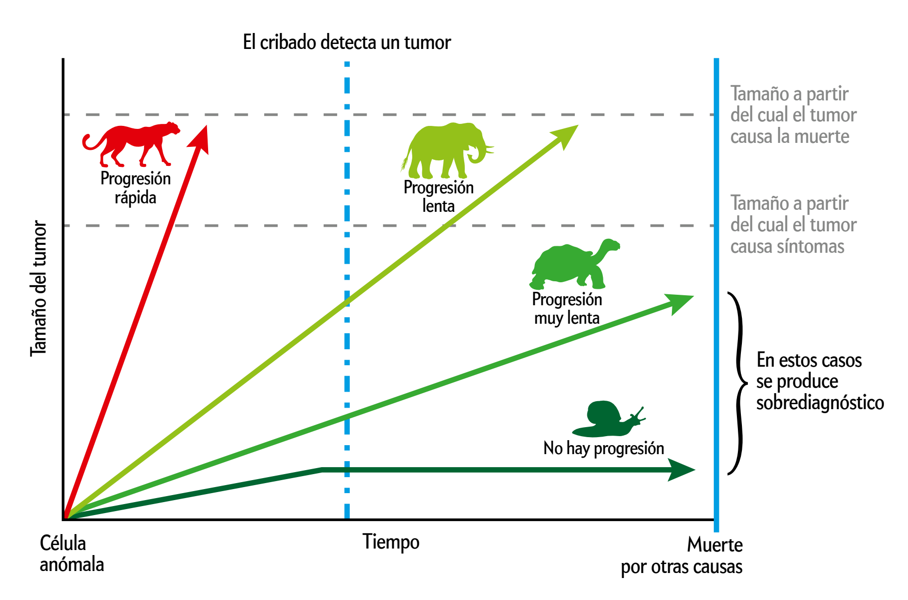
Existen numerosos factores, de tipo cultural, económico y social, que influyen en la aparición y el incremento de los casos de sobrediagnóstico. Este puede ser estimulado por la oferta de los sistemas de salud y las organizaciones sanitarias, la prescripción de los profesionales y las propias exigencias y demandas de los pacientes y la ciudadanía. Podemos analizar la problemática desde tres ejes: los programas de cribado o detección precoz de enfermedades; la promoción comercial de enfermedades «inventadas» (*disease mongering*); y, por último, la precisión cada vez mayor de las pruebas diagnósticas, que conlleva un incremento de incidentalomas (detección fortuita de alteraciones que no se buscaban y cuya historia natural se desconoce) y la consiguiente cascada diagnóstica y terapéutica en el paciente.

Ejemplos conocidos de sobrediagnóstico se producen durante los programas de cribado o detección en la población general, que pretenden identificar posibles enfermedades, como tumores, en estadios precoces. De esta manera, los cribados poblacionales de cáncer de próstata mediante el análisis de los niveles de antígeno prostático específico (PSA, por sus siglas en inglés), del cáncer de mama o el diagnóstico prenatal con ecografía levantan una gran controversia científica y social respecto al equilibrio entre los potenciales riesgos y beneficios de dichos programas.

El sobrediagnóstico también está relacionado con el concepto de promoción comercial de «nuevas enfermedades». Cada vez resulta más habitual que los medios de comunicación se hagan eco de trastornos prácticamente inofensivos y falsas dolencias que afectan a personas sanas. Aparecen así noticias y anuncios acerca de la supuesta disfunción sexual femenina, la timidez que se transforma en fobia social, la tristeza que se convierte en depresión, o el síndrome posvacacional, por poner algunos ejemplos. En definitiva, una casuística donde simples molestias o trastornos personales son elevados a la categoría de enfermedades o problemas de salud para los cuales, obviamente, suele prescribirse algún remedio farmacológico cuya efectividad, ante la subjetividad de los síntomas, suele ser más que dudosa. Tampoco deben olvidarse los efectos que pueden provocar la reducción progresiva de los umbrales diagnósticos en problemas o patologías de tipo crónico (como la hipertensión, la diabetes o la hipercolesterolemia). Tales modificaciones llevan a que personas hasta ahora consideradas sanas y asintomáticas se vean inmersas en tratamientos innecesarios que seguramente les provoquen más daños que beneficios, cuando unos pocos cambios en el estilo de vida podrían reducir los riesgos sustancialmente.

Todo ello no pasaría de ser una simple anécdota si no fuese porque las intervenciones sanitarias para diagnosticar, curar o paliar los problemas de salud —imprescindibles cuando están correctamente indicadas— comportan riesgos y efectos adversos. En concreto, conviene evaluar en cada caso la idoneidad de las pruebas diagnósticas por la imagen como la radiografía, la mamografía o la tomografía axial computarizada (TAC). Un profesional sanitario, cuando las prescribe, debe valorar qué información le aportan y la utilidad de estas ante el manejo clínico del paciente. Creer que resultan en su mayoría inocuas constituye un grave error conceptual. Con ellas se corre el riesgo de incrementar el número de resultados falsos positivos, lo que obliga a realizar más pruebas e iniciar tratamientos prescindibles, con la consiguiente angustia y ansiedad que ello genera en el paciente. Además, las pruebas de imagen radiológicas someten nuestro organismo a radiaciones que se acumulan a lo largo de los años en nuestros tejidos.

Ante tal situación, existe la necesidad imperativa de definir un nuevo modelo asistencial que aborde, con mayor información, sensibilización y diálogo con el paciente, la gestión de la incertidumbre y los riesgos, tanto de las propias enfermedades como de las intervenciones sanitarias. También será preciso realizar nuevos estudios que aporten más datos no solo sobre la eficacia y la seguridad de las intervenciones, sino también sobre los beneficios que supone no sobrediagnosticar y no tratar determinadas enfermedades.



EL SOBREDIAGNÓSTICO se produce cuando durante los programas de cribado se detectan tumores que no progresarán o lo harán lentamente, de tal modo que nunca llegarán a provocar problemas médicos.

Todo ello contando con la opinión, las preferencias y los valores de los pacientes en la decisión final.

¿Qué hacer ante el sobrediagnóstico?

La comunidad científica se ha puesto en marcha para intentar avanzar en el conocimiento de esta problemática cada vez más frecuente. Prestigiosas revistas científicas, como el *Journal of the American Medical Association* y el *British Medical Journal*, vienen desde hace algún tiempo dedicando secciones específicas al problema del sobrediagnóstico y el sobretratamiento.

Hace cuatro años se celebró la primera Conferencia Internacional sobre Prevención del Sobrediagnóstico, que anualmente reúne a varios centenares de profesionales de la salud, gestores, epidemiólogos o expertos en bioética, entre otros perfiles. Precisamente la cuarta edición de este congreso tuvo lugar el pasado mes de septiembre en Barcelona, donde los asistentes debatieron aspectos relacionados con el sobrediagnóstico desde vertientes como el envejecimiento, la genómica, los macrodatos (*big data*), el impacto económico, las reflexiones éticas, la delgada línea que existe entre la salud y la enfermedad y diversas experiencias sobre estrategias para reducir los efectos del sobrediagnóstico.

Asimismo, la reunión sirvió para atisbar las líneas futuras que puede seguir la medicina como ciencia y disciplina. Interesante fue la propuesta presentada por el Servicio Nacional de Salud en Escocia, que aboga por un modelo de atención conocida como «medicina realista». Tal estrategia, también denominada «medicina razonable» por algunos autores, propugna una nueva práctica asistencial que personalice la atención del paciente. Para ello se necesita pasar de una actitud paternalista a otra colaborativa, basada en las decisiones compartidas entre profesionales y pacientes. Esta visión también propone reducir las prácticas clínicas innecesarias y mitigar las variaciones en la atención y los resultados. Tiene por objetivo evitar posibles daños a los pacientes, favorecer una mejor gestión de los riesgos, contener el despilfarro presupuestario y potenciar el papel de los profesionales sanitarios como líderes de innovación y mejoras asistenciales.

¿Se está avanzando más allá del plano teórico?

Para evitar las prácticas clínicas de escaso valor, desde hace unos años están surgiendo varias iniciativas, como las *Do not do recommendations* («Recomendaciones de no hacer»), del Instituto Nacional de la Excelencia Clínica del Reino Unido, o *Choosing wisely* («Decidir sabiamente»), de la Junta Americana de Medicina Interna. A escala más local, cabe destacar también el proyecto *Essencial*, del Departamento de Salud de Cataluña, que cuenta con la participación de las sociedades científicas catalanas, así como las recomendaciones de «no hacer» promovidas por el Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad. A partir de aquí, el siguiente paso consistirá en implementar esas recomendaciones a la práctica diaria, algo que el proyecto *Essencial* ya está consiguiendo con la realización de un programa piloto en el que están colaborando y participando más de un centenar de equipos de atención primaria del ámbito catalán.

Por último, no cabe duda de que será necesaria una mayor concienciación y sensibilización por parte de todos los agentes de los sistemas de salud y del conjunto de la sociedad para limitar el impacto negativo que el sobrediagnóstico y el sobretratamiento puedan causar sobre la salud de la ciudadanía y la sostenibilidad de nuestros sistemas de salud.

—Cari Almazán,
—Joan M. V. Pons
—Toni Dedeu
Agencia de Calidad y Evaluación Sanitarias de Cataluña
Departamento de Salud
Generalitat de Cataluña

PARA SABER MÁS

De la parsimonia en medicina. J. M. Pons y J. M. Argimon en *Medicina Clínica*, vol. 141, n.º 9, págs. 387-389, 2013.

Role of fear in overdiagnosis and overtreatment. I. Heath en *British Medical Journal*, vol. 349, págs. g6123, 24 de octubre de 2014.

Preventing overdiagnosis: The myth, the music, and the medical meeting. R. Moynihan en *British Medical Journal*, vol. 350, pág. h1370, 18 de marzo de 2015.

Realistic medicine. Informe anual del director médico, 2014-2015. Servicio Nacional de Salud en Escocia. Gobierno de Escocia, 2016. **www.gov.scot/Resource/0049/00492520.pdf**

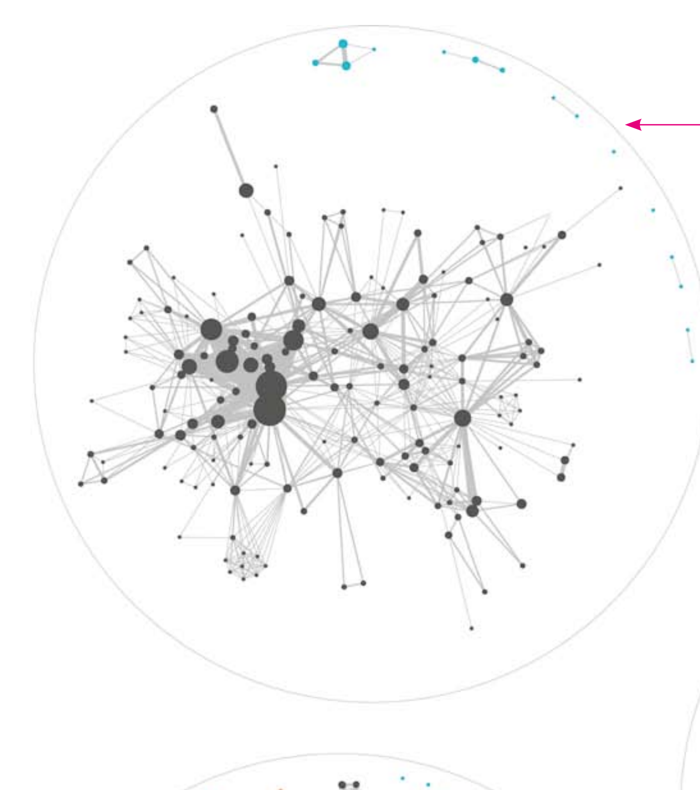
Proyecto *Essencial* **http://essencialsalut.gencat.cat/es/index.html**

EN NUESTRO ARCHIVO

Detección del cáncer. John A. Paulos en *IyC*, marzo de 2012.

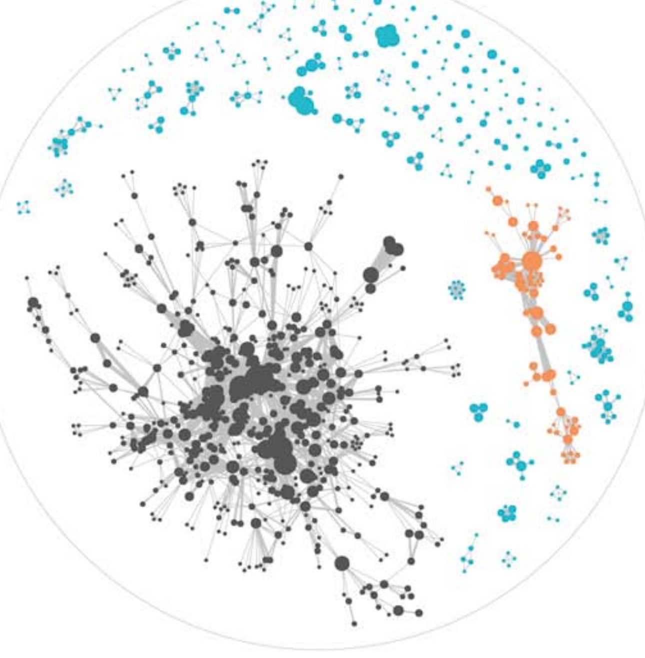
El debate del cáncer de próstata. Marc B. Garnick en *IyC*, abril de 2012.

Los riesgos de las mamografías. Alexandra Barratt en *IyC*, febrero de 2016.



TESLA: La gran mayoría de los inventores forman una gran red colaboradora (*gris*), que incluye a empleados prolíficos con varias patentes (*nodos mayores*) e individuos que hacen de puente entre múltiples equipos (*nodos con muchas líneas interconectoras*). Unos pocos empleados trabajan casi a solas (*azul*). Parece que Tesla se basa en una sola y compleja red de innovación donde casi todos los inventores están conectados con muchos otros, en parte quizá porque buena parte del trabajo tiene que ver con la tecnología de las baterías, núcleo del producto. Tanta colaboración permite que las ideas fluyan con rapidez entre muchos innovadores.

FACEBOOK: Al contrario que Tesla e Intrexon, donde domina un solo patrón de colaboración, los poseedores de patentes se organizan aquí de varias formas, quizá para contribuir a diferentes partes del producto completo. Una gran red abarca alrededor del 60 por ciento de los inventores que trabajan para la empresa (*gris*), entre ellos los más prolíficos. Sin embargo, un conjunto de empleados forma una red secundaria, bastante grande y productiva (*naranja*). Y otros trabajan en equipos más pequeños y aislados.



INNOVACIÓN

Muchas formas de innovar

Los datos relativos a las patentes muestran que las empresas siguen estrategias muy diferentes para inventar

MARK FISCHETTI

Se han escrito numerosos libros sobre la forma en que las empresas innovan, pero la mayoría se basa en estudios de casos concretos. La Oficina de Patentes y Marcas de Estados Unidos adoptó hace poco un enfoque que depende más de los datos. Analizó las patentes de los empleados de tres grandes empresas tecnológicas de campos diferentes: Tesla (*arriba*), de vehículos eléctricos; Facebook (*derecha*), de redes sociales; e Intrexon (*abajo*), de ingeniería genética. La manera en que los empleados se agrupan para inventar técnicas patentadas revela que la colaboración se organiza según distintos patrones, explica Amanda Myers, economista de la oficina de patentes. Habida cuenta de lo bien que les va a las tres compañías, parece que hay más de una forma de crear el éxito.

Cada punto, o nodo, representa a un inventor; el tamaño del punto indica el número de patentes concedidos a un inventor entre 2007 y 2011



Las líneas conectan a inventores que comparten al menos una patente; el grosor de las líneas indica el número de patentes compartidas (finas = pocas; gruesas = muchas)

Los cúmulos de puntos representan a inventores que trabajan estrechamente unidos

INTREXON: La red de inventores comprende varios equipos de tamaño considerable, que parecen trabajar recluidos en sí mismos (*cúmulos de diferentes colores*). Muchos inventores parecen trabajar solos o en pares o tríos aislados. En general, la red de innovación está muy fragmentada, quizá porque la empresa desarrolla productos especializados que difieren entre sí.

FUENTES: OFICINA DE PATENTES Y MARCAS DE EE. UU. Y WWW.PATENTSVIEW.ORG; PERISCOPIC (*gráficos*)

Pautas universales en la adquisición del lenguaje

Un estudio sobre la manera en que los niños pequeños comprenden los cuantificadores revela que los factores semánticos priman sobre los detalles gramaticales de cada lengua

ANNA GAVARRÓ

En el programa de investigación iniciado hace décadas por Noam Chomsky, el proceso de adquisición del lenguaje figura como una pieza clave para comprender la gramática, entendida como una competencia mental del ser humano en tanto que hablante nativo de una lengua. Esta facultad nos permite producir frases que nunca antes hemos oído, así como interpretar una infinitud de ellas. Al respecto, sabemos que la gramática ha de poder adquirirse en las condiciones en las que lo hacen los niños: en circunstancias variables, en ocasiones con pobreza de estímulos, en un período corto de tiempo, sin instrucciones explícitas y sin dificultad.

Hasta ahora, el estudio de la adquisición del lenguaje se ha centrado en la manera en que el individuo hace suya la morfología (el proceso de formación de palabras) y la sintaxis (la integración de palabras en frases). Hace poco, sin embargo, esta investigación se ha ampliado para incluir el caso de los cuantificadores: expresiones como *todos*, *algunos* o *ningún*. La importancia de estos términos radica en que denotan relaciones entre conjuntos, por lo que su estudio puede aportar algunas pistas clave sobre los procesos lógicos y semánticos subyacentes a la adquisición del lenguaje.

En un trabajo reciente liderado por Napoleon Katsos, de la Universidad de Cambridge, decenas de investigadores de todo el mundo hemos estudiado por primera vez el proceso de adquisición de cuantificadores en hablantes de más de 30 idiomas pertenecientes a familias lingüísticas muy diversas. Nuestros resultados, publicados hace unos meses en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, sugieren que los patrones que guían la adquisición de estos términos son universales e independientes de las particularidades gramaticales de cada lengua.

Gramática y semántica

Nuestro trabajo se inscribía en una acción COST (Cooperación en Ciencia y Tecnología) de la Unión Europea; en concreto, en el proyecto COST A33, dirigido por Uli Sauerland, del Centro de Lingüística General de Berlín. Esta iniciativa tenía como objetivo determinar la competencia lingüística de los niños de 5 años mediante métodos que permitiesen detectar posibles patologías y que, además, pudieran aplicarse a todas las lenguas europeas.

En ese contexto, el trabajo publicado en *PNAS* investigó la adquisición de los cuantificadores *todos*, *ningún*, *algunos* y *la mayoría* en niños de 5 años. Los experimentos se llevaron a cabo con un total de 768 niños, hablantes de 31 lenguas pertenecientes a 11 familias, no todas ellas europeas: vasca, sinotibetana, indoeuropea, urálica, kartveliana, afroasiática, japonesa, coreana, austronesia, dravídica y altaica. Además, se empleó un grupo de control formado por 536 adultos, hablantes de las mismas lenguas.

Cabe señalar que, desde un punto de vista gramatical, la expresión de los cuantificadores seleccionados no es la misma en todos los idiomas. Por ejemplo, *algunos* correspondía en la versión catalana del experimento a *uns quants* (literalmente, «unos cuantos»), mientras que *la mayoría* correspondía en la versión inglesa a *most*. Estas diferencias pueden hacer que un mismo cuantificador sea más transparente en un idioma que en otro, debido, por ejemplo, a si su forma gramatical refleja la pluralidad u otros aspectos.

La hipótesis central de nuestro trabajo era que la variación gramatical presente en los cuantificadores no afectaría tanto su comprensión por parte del niño como los factores estrictamente semánticos, los cuales son de carácter universal. En concreto, los elementos semánticos que contemplamos en el estudio fueron cuatro: monotonicidad, totalidad, complejidad e informatividad.

Decimos que un cuantificador es monotónico creciente si podemos hacer inferencias de subconjuntos a conjuntos. Por ejemplo, *todos* es monotónico creciente porque si la frase:

> Todos los estudiantes juegan al baloncesto

es cierta, entonces también lo es:

> Todos los estudiantes juegan a un deporte.

En cambio, *ningún* es monotónico decreciente porque, aunque la afirmación:

> Ningún estudiante juega al baloncesto

sea verdadera, eso no implica que lo sea:

> Ningún estudiante juega a un deporte.

Por otro lado, los cuantificadores de totalidad atribuyen una propiedad a todos los miembros de un conjunto, pero no a una parte. Son cuantificadores de totalidad *todos* y *ningún*, pero no *algunos* o *la mayoría*.

En términos de complejidad, *algunos* es menos complejo que *la mayoría*. Ello se debe a que, para evaluar si es cierta una aseveración como:

> La mayoría de los estudiantes juegan al baloncesto

no basta con saber para cuántos miembros del conjunto se cumple, sino en qué proporción se satisface con respecto al total. En cambio, para interpretar la oración:

> Algunos estudiantes juegan al baloncesto

no hace falta comparar el tamaño de dos conjuntos (en este caso, el de aquellos que juegan y el de la totalidad de estudiantes).

Por último, la informatividad asociada a los cuantificadores permite distinguirlos desde un punto de vista pragmático; es decir, con relación al contexto. Un cuantificador es más informativo que otro en un contexto dado cuando la información que proporciona no solo es cierta, sino también suficiente. Por ejemplo, la frase:

> Algunos gatos maúllan

es cierta si lo es:

> Todos los gatos maúllan;

¿HAY ALGUNAS NARANJAS EN LOS PLATOS?

Los cuantificadores (términos como *todos* o *algún*) son palabras que denotan relaciones entre conjuntos, por lo que resultan útiles para estudiar la adquisición del lenguaje más allá de la morfología y la sintaxis. Un trabajo reciente ha evaluado la manera en que los niños pequeños comprenden el significado de estos vocablos. ¿Depende el proceso de las particularidades gramaticales de cada lengua u obedece a patrones semánticos universales?

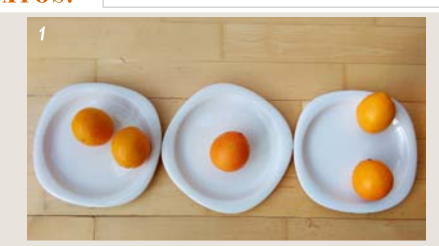
Los investigadores pidieron a niños hablantes de 31 idiomas que juzgasen la veracidad de varias afirmaciones (*abajo*) relativas a ciertas imágenes (*derecha*). Las frases reproducidas aquí ilustran los ejemplos usados para el catalán, la lengua analizada por la autora de este artículo.

- **a** *Totes les taronges són als plats*
  «Todas la naranjas están en los platos»
- **b** *Cap de les taronges no és als plats*
  «Ninguna naranja está en los platos»
- **c** *Unes quantes taronges són als plats*
  «Algunas naranjas están en los platos»
- **d** *La majoria de les taronges són als plats*
  «La mayoría de las naranjas están en los platos»

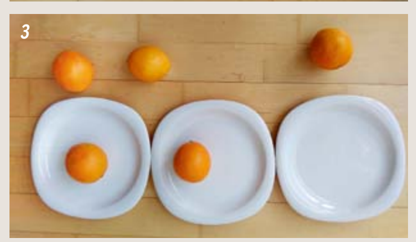
La frase **a** es cierta para la fotografía (*1*), pero no para las otras. La **b** es verdadera para la (*2*), la **c** para la (*3*) y la (*4*), y la **d** para la (*4*). En el caso de la imagen (*1*), la frase **c** también es cierta pero poco informativa, ya que no solo algunas naranjas están en los platos, sino todas ellas.

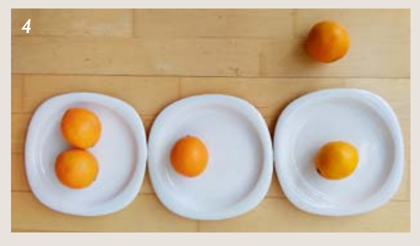
El experimento empleó un conjunto de adultos como grupo de control. En estos últimos, el porcentaje de respuestas correctas fue del 99 por ciento en las preguntas sobre la veracidad del enunciado y de un 84 por ciento en las que contrastaban la informatividad. En el caso de los niños, el porcentaje de aciertos fue del 82 y del 51 por ciento, respectivamente.

Los autores hallaron pautas similares en todas las lenguas analizadas. Ello permite concluir que, en la adquisición de cuantificadores, los factores semánticos (de carácter universal) cobran mayor importancia que los gramaticales (propios de cada lengua).









ANNA GAVARRÓ

pero, aun sin ser falsa, es menos informativa que la segunda.

Universales lingüísticos

Nuestro estudio planteaba si las variables expuestas desempeñaban algún papel en la adquisición de los cuantificadores. De ser el caso, cabía esperar que su comprensión por parte de los niños se relacionase de manera sistemática con ellas, con independencia de los aspectos gramaticales de cada cuantificador en una lengua concreta.

Para medir la comprensión de los cuantificadores, el método empleado consistió en pedir a los participantes que asignasen un valor de verdad a una frase en relación con una representación gráfica. Por ejemplo, ante una imagen con frutas situadas dentro o fuera de varios platos, los sujetos debían responder si una afirmación como «Algunas naranjas están en los platos» era cierta o no.

En 27 de los 31 idiomas incluidos en el estudio, los niños demostraron entender mejor los cuantificadores monotónicos crecientes, como *todos*, que los decrecientes, como *ningún*. En 25 lenguas comprendían mejor los cuantificadores de totalidad que el resto. Y en todas ellas entendían mejor los cuantificadores menos complejos que los que implicaban un mayor grado de complejidad, y también emitían juicios más parecidos a los de los adultos cuando evaluaban la verdad de una afirmación que cuando juzgaban su grado de informatividad.

Tales resultados confirman la relevancia de los factores semánticos en la adquisición del lenguaje. Además, este aspecto parece ser generalizable a todos los idiomas, lo que aporta indicios de la existencia de patrones universales y semánticos en el proceso de adquisición. Esta conclusión se muestra compatible con los postulados innatistas de Chomsky, aunque plantea la pregunta de si nos encontramos ante universales estrictamente lingüísticos o más bien de carácter conceptual. [*Para otra perspectiva sobre el problema de la adquisición del lenguaje, véase* «Hacia una nueva visión del lenguaje» por Paul Ibbotson y Michael Tomasello, *en este mismo número*.]

—Anna Gavarró
Centro de Lingüística Teórica
Universidad Autónoma de Barcelona

PARA SABER MÁS

Logic and conversation. Paul Grice en *Syntax and semantics, 3: Speech acts*, dirigido por Peter Cole y Jerry Morgan. Academic Press, 1975.
Unification in child language. Stephen Crain y Rosalind Thornton en *From grammar to meaning: The spontaneous logicality of language*, dirigido por Ivano Caponigro y Carlo Cecchetto. Cambridge University Press, 2013.
Cross-linguistic patterns in the acquisition of quantifiers. Napoleon Katsos et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 113, n.º 33, págs. 9244-9249, agosto de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Adiós al principio modular del lenguaje. Ina Bornkessel-Schlesewsky y Matthias Schlesewsky en *MyC*, n.º 53, 2012.
Lenguaje, redes y evolución. Ricard Solé, Bernat Corominas Murtra y Jordi Fortuny en *IyC*, mayo de 2013.

MIGRACIONES

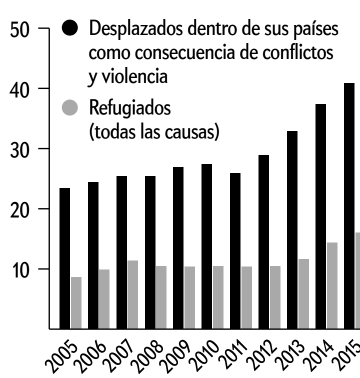
Refugiados en su país

La violencia y los desastres naturales fuerzan cada vez más la huida de personas dentro de su propia nación

MARK FISCHETTI

Cada año, millones de refugiados abandonan sus países natales. Sin embargo, el número de desplazados internos (personas que dejan sus hogares pero que continúan viviendo en territorio nacional) es aún mayor y crece a gran velocidad (A). Solo en 2015, 28 millones de personas se vieron forzadas a emprender desplazamientos de tales características (B). Irónicamente, no pocos países protegerán y asistirán a quienes entran en su territorio cruzando la frontera, pero no harán lo propio con quienes permanecen dentro pero huyen de la violencia, los desastres naturales o los causados por el ser humano. Estos emigrantes pueden vivir años en condiciones terribles. Las agencias internacionales han alertado sobre la tendencia con la esperanza de que las ayudas que reciben mejoren.





B Desplazados dentro de sus propios países en 2015

- Debido a conflictos
- Debido a desastres naturales
  - Terremotos, volcanes
  - Fenómenos meteorológicos

Conflicto **8,8 millones**

Desastres naturales **19,2 millones**

En 2015, casi 3,7 millones de residentes en India se vieron forzados a abandonar su hogar, una cifra superior a la de cualquier otro país. Dos acontecimientos causaron gran parte de las migraciones: las grandes inundaciones de noviembre, y un ciclón e inundaciones en julio.

En EE.UU., 63.000 personas se desplazaron dentro del territorio nacional debido sobre todo a las inundaciones.

Diez mayores desplazamientos

Total por país o región	
406.000	Afganistán
19.000	Argelia
36.000	Argentina
531.000	Bangladés
11.000	Bolivia
59.000	Brasil
26.100	Burundi
82.000	Camerún
13.000	Canadá
211.100	República Centroafricana
36.000	Chad
1.047.000	Chile
3.602.000	China continental
228.600	Colombia
727.000	Rep. Dem. del Congo
28.000	República Dominicana
78.100	Egipto
160.000	Etiopía
34.000	Guinea
3.656.000	India
204.200	Indonesia
1.137.000	Irak
486.000	Japón
19.000	Kazajistán
105.000	Kenia
12.000	Laos
100.000	Libia
87.000	Madagascar
343.000	Malawi
21.000	Malasia
97.000	México
61.000	Mozambique
1.634.000	Myanmar
2.623.000	Nepal
85.000	Níger
837.000	Nigeria
1.002.000	Pakistán
171.000	Paraguay
2.509.000	Filipinas
149.000	Somalia
214.000	Sudán del Sur
66.000	Sri Lanka
152.300	Sudán
1.300.000	Siria
27.000	Taiwán
11.000	Tayikistán
942.000	Ucrania
63.000	EE.UU.
24.000	Uruguay
65.000	Vanuatu
45.000	Venezuela
10.700	Cisjordania
2.258.000	Yemen
	Otros países

FUENTES: ALTO COMISIONADO DE LA ONU PARA LOS REFUGIADOS (*datos del total de refugiados*), *GLOBAL REPORT ON INTERNAL DISPLACEMENT*, ALEXANDRA BILAK ET AL., CENTRO DE MONITORIZACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS INTERNOS, MAYO DE 2016 (*datos de desplazados internos*); TIFFANY FARRANT-GONZALEZ (*gráfico*)

FÍSICA TEÓRICA

LA GRAVEDAD CUÁNTICA, CAMINO DE CONVERTIRSE EN CIENCIA

Durante décadas, la ausencia de predicciones verificables empíricamente ha relegado la investigación en gravedad cuántica al ámbito matemático. Esa situación podría cambiar dentro de poco

Sabine Hossenfelder



TEORÍAS SIN CONFIRMAR: ¿Queda el espaciotiempo a pequeña escala descrito por una red de espines, por cuerdas vibrantes o de otro modo? De momento, la descripción cuántica de la gravedad sigue esperando un veredicto experimental.

Sabine Hossenfelder es física teórica. Investiga en el Instituto de Estudios Avanzados de Fráncfort, una institución dedicada a la investigación básica interdisciplinar. Es autora del blog *Backreaction*: backreaction.blogspot.com.



«Un físico es alguien que resuelve problemas que no sabías que existían usando métodos que no entiendes.» Esta frase aparecía en una camiseta que mi madre me regaló una vez por mi cumpleaños. Todavía la llevo ocasionalmente cuando quiero enfadar a mi hermano, ingeniero.

La máxima toca un punto delicado de la física moderna: buena parte de los problemas a los que se enfrenta la disciplina se encuentran excesivamente alejados de la vida cotidiana. En ocasiones, tras algunas de las preguntas que se hacen los físicos solo se esconde un malestar estético, una sensación de falta de elegancia. Pensemos en las masas de las partículas del modelo estándar: una lista de números que los investigadores han medido pero cuyos valores no consiguen explicar. Puede que dicha explicación exista, pero puede también que no. En realidad, se trata de un problema estético, ya que el modelo funciona a la perfección.

Otro ejemplo lo hallamos en la constante cosmológica, la cual implica que el universo no solo se expande, sino que lo hace de forma acelerada, un descubrimiento que en 2011 fue reconocido con el premio Nobel de física. Pero ¿por qué esta constante toma el valor que observamos (diminuto, aunque distinto de cero) y no otro? ¿Por qué no es simplemente nula, como se supuso durante largo tiempo? También aquí se trata de un problema que nosotros mismos nos hemos creado, ya que podríamos darnos por contentos al comprobar que, si introducimos la constante cosmológica en las ecuaciones de la relatividad general, la teoría resultante describe el universo de manera satisfactoria.

Sin embargo, los físicos también nos enfrentamos a otra clase muy diferente de problemas. A veces, los conceptos básicos que empleamos se contradicen entre sí. Cuando eso ocurre, decimos que nos hallamos ante una «inconsistencia interna» de la teoría. La búsqueda del bosón de Higgs, por ejemplo, se hallaba relacionada con una dificultad de este tipo. Sin él, el modelo estándar deja de funcionar bien a energías elevadas, ya que al sumar las probabilidades asociadas a todos los resultados posibles de un experimento, obtenemos un número distinto de uno. Introducir el bosón de Higgs no solo era la manera más sencilla de resolver el rompecabezas, sino que, además, ha demostrado ser la correcta. De no haber aparecido en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, tendría que haber existido algo completamente nuevo que enmendase la falta de coherencia interna de la teoría.

En física de altas energías hay otro problema que tampoco es de naturaleza estética. Uno que pone de manifiesto una inconsistencia fundamental de nuestras teorías y que hace que, bajo ciertas circunstancias, estas resulten completamente inútiles: el problema de cómo cuantizar la gravedad. Hoy por hoy, esta pregunta carece de respuesta.

El modelo estándar no incluye la gravitación. En realidad, tampoco sería necesario que la incorporase, ya que la gravedad no desempeña ningún papel cuando queremos calcular lo que ocurre en un acelerador de partículas. La atracción gravitatoria entre partículas elementales es tan minúscula que resulta imposible de medir. Y no solo con la tecnología actual; es probable que tales efectos no se logren observar nunca.

Sin embargo, el modelo estándar es una teoría cuántica. Entre otras cosas, eso significa que lo que único que cabe predecir son probabilidades: no podemos saber con total certeza qué ocurrirá al efectuar un experimento, sino solo con qué probabilidad obtendremos tal o cual resultado. También significa que las partículas cuánticas pueden hallarse en dos lugares al mismo tiempo, aunque si medimos su posición siempre las encontraremos en un solo sitio.

La gravedad, en cambio, queda descrita por la teoría general de la relatividad. Esta es una teoría clásica, por lo que no existen las indeterminaciones de las que hablábamos más arriba. El campo gravitatorio no puede encontrarse en dos posiciones al mismo tiempo, de forma que al medirlo se «decida» por una de las dos. Pero, por otro lado, todas las partículas poseen energía, y todo lo que contiene energía gravita. Así pues, si consideramos una partícula cuántica en un estado en el que su posición no está bien determinada, ¿dónde se localiza su campo gravitatorio? Este debería, al igual que las partículas que lo producen, encontrarse en varios sitios al mismo tiempo, algo imposible en una teoría clásica. He aquí una inconsistencia interna.

Otras razones también llevan a pensar en la necesidad de formular una teoría cuántica de la gravedad. Una de ellas es que la teoría de la relatividad general predice la existencia de singularidades: regiones donde la densidad de energía y la curvatura del espacio se tornan infinitas. Tales situaciones contradicen toda imagen física, por lo que no deberían aparecer.

Para entender qué sucede en estos casos, podemos recurrir a una analogía cotidiana. Consideremos la forma que adopta una gota de agua cuando cae de un grifo. Al desprenderse, la superficie de la gota exhibe una geometría puntiaguda en su parte

EN SÍNTESIS

A distancias minúsculas y energías extremas, los efectos gravitatorios se tornan tan importantes como los cuánticos. Hace décadas que los físicos buscan una teoría capaz de aunar ambos fenómenos.

Hasta ahora, la falta de predicciones comprobables experimentalmente ha hecho que todos los esfuerzos por formular una teoría cuántica de la gravedad se limiten a estudiar sus aspectos matemáticos.

Varios desarrollos técnicos recientes han avivado la esperanza de medir algunos efectos cuánticos de la gravedad. Las posibilidades abarcan desde las observaciones astronómicas hasta ciertos experimentos ópticos y micromecánicos.

superior. Matemáticamente, ese punto constituye una singularidad. No obstante, sabemos que tratar el agua como un líquido no es más que una aproximación útil para describir una gran cantidad de partículas en interacción. A nivel microscópico, el lugar donde la gota se separa del grifo no es un punto de tamaño cero, sino un pequeño conjunto de moléculas de agua.

La singularidad que aparece al considerar la gota como un líquido nos revela que la imagen del fluido comienza a fallar a distancias cortas. Se cree que con la gravedad ocurre algo parecido. La singularidad asociada al centro de un agujero negro, por ejemplo, nos estaría indicando que la relatividad general pierde su validez a pequeñas distancias y que, a partir de ahí, deberíamos emplear una descripción más fundamental. Dicha descripción llegaría de la mano de una teoría cuántica de la gravedad.

Que los agujeros negros se encuentran en el límite de validez de nuestras teorías físicas es algo que queda patente en la llamada «paradoja de la información». Al combinar la teoría cuántica de campos con la relatividad general, se llega a la conclusión de que los efectos cuánticos de la materia causan que los agujeros negros radien partículas; un fenómeno conocido como «radiación de Hawking». Como consecuencia, estos objetos van perdiendo masa poco a poco hasta que acaban por desaparecer. Sin embargo, la radiación emitida durante el proceso es térmica, por lo que no contiene ninguna información más allá de su temperatura. No importa cómo se haya creado el agujero negro; al final, lo único que quedará de él será una radiación cuyas propiedades no dependerán para nada del proceso por el que se formó. Lo único que podremos deducir a partir de ella será la masa inicial del objeto, pero nada más. El problema radica en que un proceso tan irreversible como el que acabamos de describir está prohibido por las leyes cuánticas [*véase* «Agujeros negros y muros de fuego», por Joseph Polchinski; Investigación y Ciencia, abril de 2015, *reeditado para* «Fronteras de la física cuántica», colección Temas de IyC, n.º 86, 2016]. Una vez más, creemos que esta paradoja requiere cuantizar la gravedad.

EL PROBLEMA DE LOS INFINITOS

Así pues, los físicos contamos con buenas razones para buscar una teoría cuántica de la gravedad. Sin embargo, resulta extraordinariamente difícil formular una que no presente contradicciones matemáticas.

En los años cuarenta del siglo xx se consiguió cuantizar la electrodinámica. Aquel éxito motivó que, en los años sesenta, Richard Feynman y Bryce DeWitt, entre otros investigadores, intentasen desarrollar una teoría análoga: la «gravedad cuántica perturbativa». Sin embargo, al efectuar cálculos con esta teoría nos encontramos una y otra vez con resultados infinitamente grandes. Lo mismo ocurre en electrodinámica cuántica; no obstante, en ese caso, existe un procedimiento que permite eliminar los infinitos de todas las predicciones físicas. Dicho método recibe el nombre de «renormalización». Para que funcione, por cada cantidad infinita que deseemos eliminar es necesario introducir un parámetro cuyo valor pueda medirse experimentalmente. En electrodinámica cuántica, basta con considerar la masa y la carga del electrón para que todos los infinitos desaparezcan de las cantidades medibles.

No obstante, la misma receta no puede aplicarse a la gravedad cuántica perturbativa, ya que el número de cantidades infinitas independientes que aparecen es, a su vez, arbitrariamente grande. Por tanto, para eliminarlas sería necesario introducir un número infinito de parámetros, los cuales jamás podrían quedar determinados por un número finito de experimentos. En otras palabras: la teoría pierde todo su poder predictivo, por lo que se torna inútil en cuanto descripción fundamental de la naturaleza.

Con todo, las teorías no renormalizables no son necesariamente estériles, ya que pueden funcionar bien a energías bajas. Ello se debe a que en dicho régimen solo es necesario considerar un pequeño número de cantidades divergentes. Por tanto, para lograr que los infinitos desaparezcan de los cálculos, basta con introducir unos pocos parámetros que sí pueden determinarse experimentalmente. No obstante, los problemas se manifestarán cuando intentemos describir procesos a energías más elevadas, ya que entonces aparecerán más y más cantidades infinitas. En el caso de la gravedad cuántica perturbativa, esto ocurre al llegar a la «energía de Planck», unos 10^{15} teraelectronvoltios (TeV). Esta energía es enorme, unos 15 órdenes de magnitud superior a la que alcanzan los experimentos del LHC.

Por tanto, describir la gravedad a la escala de Planck nos obliga a buscar otra teoría, una que esté libre de contradicciones internas. En otras palabras, necesitamos una teoría cuántica «completa» de la gravedad. En este sentido, la gravedad perturbativa no es más que una teoría efectiva: aunque permite calcular cantidades observables a energías bajas, resulta inadecuada como teoría fundamental, ya que no permite realizar predicciones más allá de cierto régimen. Por desgracia, y aun después de décadas de trabajo, todavía desconocemos qué características debería presentar esa teoría completa de la gravedad cuántica.

La idea de que el espaciotiempo pueda tener la estructura de un retículo regular es muy probablemente incorrecta

DISTANCIAS MÍNIMAS

Los problemas con un número infinito de cantidades divergentes aparecieron en otro contexto durante los años treinta del siglo pasado. Por aquel entonces, el origen de los quebraderos de cabeza era la desintegración beta del núcleo atómico. El célebre físico italiano Enrico Fermi había desarrollado una teoría que describía el fenómeno de manera satisfactoria, pero que, sin embargo, adolecía del mismo problema: no era renormalizable. Más allá de cierta escala de energía —por entonces inalcanzable en los experimentos— la teoría de Fermi solo proporcionaba resultados absurdos.

Werner Heisenberg opinaba que el origen de dichas dificultades radicaba en que, en las colisiones de partículas realizadas a energías superiores a aquella a partir de la cual el modelo de Fermi fallaba, se producía un número ingente de partículas de forma simultánea. Como solución, propuso la existencia de una longitud mínima: una por debajo de la cual no tendría sentido realizar mediciones. La propuesta de Heisenberg era una con-

secuencia intelectual de su principio de incertidumbre, el cual establece la imposibilidad de determinar, al mismo tiempo y con una precisión arbitraria, la posición y la velocidad de una partícula. Cuanto más precisa resulta la medición de una de estas cantidades, mayor se torna la indeterminación en la otra. Según Heisenberg, dicha longitud mínima evitaba la aparición de cantidades infinitas, ya que sería físicamente imposible focalizar la energía necesaria para producir una situación en la que la teoría dejase de funcionar.

Ahora sabemos que, por lo que se refiere a la desintegración beta, Heisenberg estaba equivocado. El modelo de Fermi no es más que una teoría efectiva que, a energías elevadas, se completa con la teoría cuántica de campos que hoy empleamos para describir la interacción electrodébil. En esta última, los infinitos pueden eliminarse usando el procedimiento habitual de renormalización. La energía a la que la teoría de Fermi fallaba era, precisamente, la correspondiente a la masa del bosón *W*, uno de los mediadores de la interacción electrodébil. Cuando en una colisión entre partículas se alcanza esta energía, es necesario considerar la posibilidad de que se cree un bosón *W*. Eso no puede ocurrir a energías menores, y por eso la teoría de Fermi —que no incluye dicha partícula— funciona bien en ese régimen.

Por desgracia, la gravedad cuántica perturbativa no puede completarse mediante la introducción de una partícula mediadora masiva. Ello se debe a que, al contrario que la interacción electrodébil, la gravedad constituye una fuerza de largo alcance. Sus efectos pueden medirse a distancias enormes, por lo que la partícula transmisora de la interacción ha de tener necesariamente una masa nula o muy pequeña. De hecho, sabemos que así ocurre con el gravitón, la partícula mediadora de la gravedad. La propagación de ondas gravitacionales permite obtener una cota máxima para la masa de esta partícula. La detección directa de estas ondulaciones del espaciotiempo, anunciada en 2015, posibilitó demostrar que el gravitón ha de tener una masa muy inferior a la del neutrino, la más ligera de todas las partículas con masa conocidas.

Con todo, la idea básica de una longitud mínima sigue estando presente de una forma u otra en las propuestas actuales

MIKE BECKERS/*SPECTRUM DER WISSENSCHAFT*

TEORÍAS

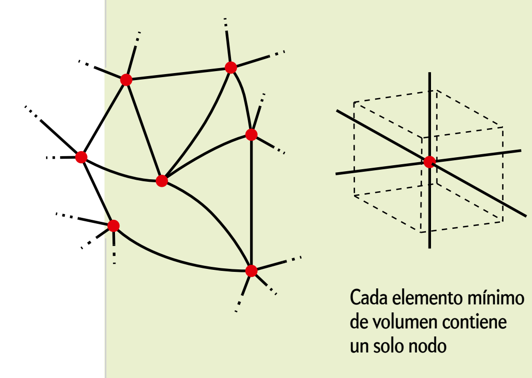
Múltiples caminos hacia la gravedad cuántica

En las últimas décadas, los físicos han desarrollado varios modelos matemáticos para conjugar la gravedad y las leyes cuánticas. A continuación presentamos algunos de los que más atención han recibido.

Gravedad cuántica de bucles

Aquí el espaciotiempo emerge a partir de una estructura subyacente consistente en «bucles», o lazos. El espaciotiempo no es suave: a distancias próximas a la longitud de Planck, aparece una entidad cuántica formada por los bucles y sus nodos. Desde un punto de vista matemático, los nodos de esta red se asemejan a los espines de las partículas elementales, razón por la que los físicos también hablan de «redes de espines». La gravedad cuántica de bucles vivió un importante desarrollo durante los años setenta y ochenta del siglo pasado; hoy es considerada como uno de los modelos más prometedores.

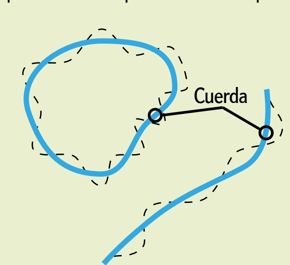
La geometría del espacio está determinada por redes de espines



Cada elemento mínimo de volumen contiene un solo nodo

Teoría de cuerdas

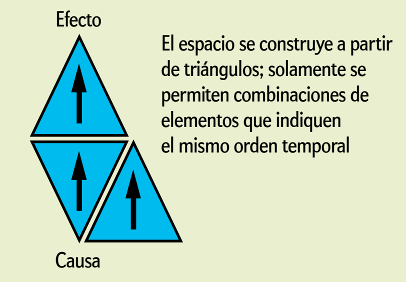
Esta teoría parte de la idea de que los objetos fundamentales de la naturaleza no son partículas, sino pequeñas entidades unidimensionales, o «cuerdas». Al no haber objetos puntuales, se evitan los infinitos que aparecen en la teoría cuántica de campos. Una consecuencia típica de la teoría de cuerdas es que requiere la existencia de dimensiones adicionales del espacio, más allá de las tres que percibimos. Para explicar por qué no las vemos, esas dimensiones extra deberían estar enrolladas sobre sí mismas en un subespacio lo suficientemente pequeño. La teoría predice la existencia de nuevas partículas, sobre todo en el contexto de la supersimetría, un marco teórico general en el que, por cada clase de partícula conocida, debería existir otra de masa mucho mayor. La detección de tales partículas supondría un importante espaldarazo para la teoría de cuerdas; sin embargo, hasta ahora no han aparecido.



Todos los fenómenos y todas las partículas de la naturaleza se explican a partir de los modos de vibración de objetos unidimensionales

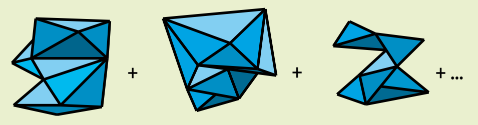
Triangulaciones dinámicas causales

Aquí el espaciotiempo a nivel microscópico se construye a partir de pequeños triángulos. El adjetivo *causal* proviene del hecho de que solamente pueden combinarse aquellos triángulos que «apunten» en la misma dirección temporal. A partir de ahí, los elementos individuales del espaciotiempo se autoorganizan. La dinámica que emerge en estos modelos es similar a la de ciertas estructuras que encontramos en la



El espacio se construye a partir de triángulos; solamente se permiten combinaciones de elementos que indiquen el mismo orden temporal

La forma más probable surge como superposición de todas las ordenaciones posibles



de gravedad cuántica, ya que permite controlar muchos de los infinitos que aparecen en los cálculos. Como hemos mencionado, los problemas surgen al considerar energías muy elevadas. En mecánica cuántica, las partículas se comportan también como ondas y viceversa, de modo que los procesos que transcurren a energías muy elevadas corresponden a longitudes de onda diminutas. Así pues, los infinitos aparecen al analizar aquellos fenómenos que se desarrollan en distancias minúsculas. En términos de longitud, la escala a partir de la cual la teoría falla es del orden de 10^{-35} metros. Esta distancia, conocida como longitud de Planck, corresponde a la longitud de onda asociada a una partícula que ha sido acelerada hasta alcanzar la energía de Planck. Una teoría completa de la gravedad cuántica necesita evitar esas distancias tan cortas, y eso es precisamente lo que logra una longitud mínima.

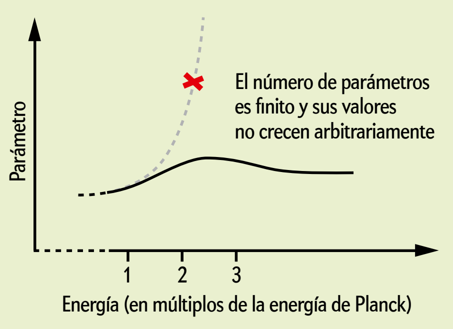
Existen varios marcos teóricos que aspiran a proporcionar una descripción cuántica de la gravedad (*véase el recuadro* «Múltiples caminos hacia la gravedad cuántica»). En la gravedad cuántica de bucles, por ejemplo, las superficies y los volúmenes se construyen a partir de ciertos elementos básicos de tamaño finito, cuya escala lineal corresponde aproximadamente a la longitud de Planck. En la teoría de cuerdas, las distancias ultracortas se evitan gracias al tamaño característico de las propias cuerdas. En la teoría de triangulaciones dinámicas causales, el espaciotiempo a escala microscópica queda representado por elementos cuyas caras son pequeños triángulos. Los defensores de la gravedad asintóticamente segura argumentan que la gravitación sí es renormalizable, aunque en cierta forma compleja que no resultaría aparente en la gravedad cuántica perturbativa; también en este caso hay indicios que apuntan a la existencia de una longitud mínima. Otros modelos, como la gravedad emergente, consideran que el espaciotiempo tal vez pueda describirse de manera análoga a un fluido. En la teoría de conjuntos causales, el espaciotiempo no existiría como tal, sino que solo habría un gran conjunto de puntos discretos.

Aunque de forma muy diversa, en todas estas propuestas aparece antes o después una longitud fundamental. La posibi-

naturaleza a grandes escalas o a otras que aparecen en simulaciones informáticas. En ellas, a partir de elementos microscópicos muy variables, se obtienen configuraciones estables usando determinadas reglas de combinación y condiciones de contorno.

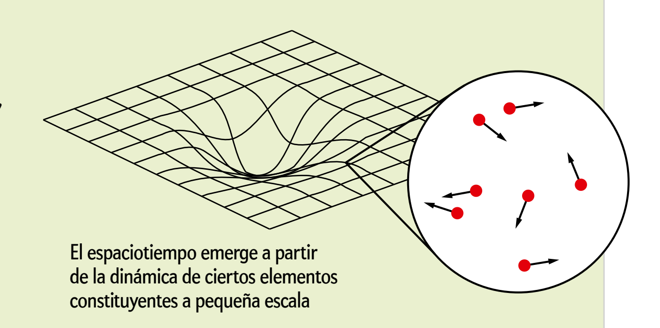
Gravedad asintóticamente segura

Al aplicar las reglas usuales de la teoría cuántica de campos a la gravedad, encontramos que el resultado deja de funcionar a energías muy elevadas, ya que se hace necesario determinar un número infinito de parámetros. No obstante, existe la posibilidad de que, aun en el límite de energías infinitamente altas, baste con fijar un número finito de cantidades que, a su vez, no sean divergentes. En tal caso, decimos que la teoría es «asintóticamente segura». Esta idea cobró relevancia gracias al trabajo de Christof Wetterich, de la Universidad de Heidelberg, y Martin Reuter, de la Universidad Johannes Gutenberg de Maguncia, quienes en los años noventa desarrollaron las herramientas teóricas adecuadas. En todo caso, dada la imposibilidad de trabajar con las cantidades de dimensionalidad infinita que requiere el modelo, es necesario realizar simplificaciones.



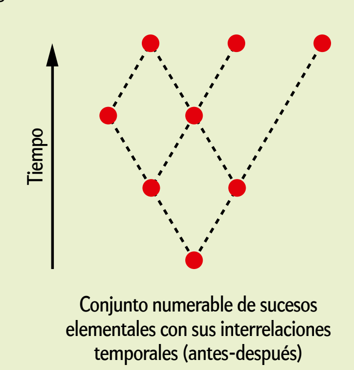
Gravitación emergente

Los fluidos, a pesar de estar constituidos por multitud de partículas con muchos grados de libertad, pueden describirse por medio de la hidrodinámica, cuyas leyes no hacen referencia a las moléculas individuales que componen el sistema. Un punto de partida análogo para la gravedad se basa en suponer que el comportamiento del espaciotiempo y de su curvatura puede derivarse a partir de las interacciones de ciertos elementos microscópicos. Esta idea se retrotrae al trabajo del físico soviético Andréi Sájarov, quien en 1967 llegó a la conclusión de que la gravedad podría aparecer como resultado de las fluctuaciones del vacío producidas por otros campos. El fenómeno sería similar a la manera en que un campo magnético induce una corriente eléctrica, razón por la que también se conoce como «gravedad inducida».



Conjuntos causales

En esta teoría el espaciotiempo no es continuo, sino que consta de multitud de puntos discretos. Los procesos físicos pueden derivarse a partir de un principio de orden establecido en dicho conjunto. Sus elementos están relacionados causalmente entre sí, de modo que los posibles movimientos de las partículas forman una especie de «árbol genealógico». El volumen de una región del espacio se obtiene por una simple suma. Aunque este enfoque parte de un número relativamente pequeño de suposiciones, permite hacer algunas predicciones comprobables. Por ejemplo, sus proponentes calcularon el valor de la constante cosmológica ya en los años noventa (antes de que se detectase la expansión acelerada del universo) y obtuvieron un valor del mismo orden de magnitud que el observado. No obstante, numerosas cuestiones relativas a la dinámica de la teoría siguen abiertas.

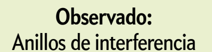


Efectos astronómicos

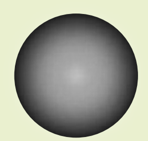
El carácter cuántico de la gravedad podría generar efectos medibles en ciertas observaciones astronómicas. A continuación se muestran algunas de esas improntas en la radiación procedente de fuentes lejanas (*derecha*), así como las señales detectadas hasta el momento (*izquierda*).

Imagen de un cuásar lejano visto a través del telescopio





Observado: Anillos de interferencia



Posible efecto: El patrón de interferencia se difumina a medida que aumenta la distancia a la fuente

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN LA AUTORA

lidad de que exista una distancia mínima ha sido considerada de gran interés por algunos filósofos, ya que algo así podría indicar que realmente nos hallamos ante una «teoría final»: a distancias menores, simplemente no habría ninguna estructura que observar.

MÁS ALLÁ DE LA TEORÍA

Aparte de una longitud mínima, todos los modelos de gravitación cuántica conocidos hasta la fecha tienen otra propiedad en común: ninguno de ellos puede ponerse a prueba por medio del experimento. En mis años de estudiante, hacia el cambio de siglo, nadie se tomaba en serio la posibilidad de que las teorías de gravedad cuántica pudieran llegar a comprobarse empíricamente. Se suponía que ninguno de los experimentos necesarios podría llevarse a cabo jamás. Por esa razón, en lugar de buscar efectos medibles, los investigadores dedicaron sus esfuerzos a estudiar la consistencia matemática de las teorías.

Ese enfoque siempre me ha parecido perturbador: es imposible construir una teoría científica partiendo exclusivamente de su plausibilidad matemática. A fin de cuentas, siempre es posible considerar sistemas de axiomas que, aun siendo coherentes desde un punto de vista matemático, no guarden ninguna relación con el mundo real. Y, por otro lado, una teoría que no establece relación alguna con las observaciones no merece, en mi opinión, llamarse científica. Por esa razón, hace tiempo que decidí dirigir mi investigación hacia la posibilidad de explorar empíricamente las teorías de gravedad cuántica.

Dicho objetivo reviste no pocas dificultades, ya que, de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza, la gravedad es con mucho la más débil de todas. La única razón por la que se nos hace tan evidente en nuestra experiencia cotidiana es que, a diferencia del resto de las interacciones, no hay manera de apantallarla. Sin embargo, si comparamos la fuerza gravitatoria y la eléctrica entre dos partículas elementales, como dos electrones, veremos que la primera es unos 40 órdenes de magnitud más débil que la segunda. Este efecto se hace aparente en un simple imán de nevera: el campo creado por esos pocos gramos de metal basta para compensar la atracción gravitatoria de toda la Tierra.

Nadie sabe por qué la gravedad es tan débil (este fenómeno, conocido como «problema de las jerarquías», constituye un buen ejemplo de uno de los problemas estéticos que mencionábamos al principio). Sin embargo, sabemos que la intensidad de la gravedad aumenta con la energía. A partir de ahí, podemos extrapolar y estimar la escala a la cual los efectos cuánticos de la gravedad se tornarían equiparables a los del resto de las interacciones. Esto ocurre a la energía de Planck.

La energía de Planck es tan gigantesca que resulta imposible de alcanzar en un acelerador de partículas. En realidad, el problema no radica en su valor numérico, pues este corresponde a la energía que generaría la combustión de la gasolina almacenada en el depósito de un coche. El verdadero inconveniente reside en que toda esa energía debería concentrarse en una sola partícula elemental. Para que en una colisión entre partículas pudiera detectarse un gravitón con una probabilidad apreciable, tendríamos que construir un acelerador del tamaño de la Vía Láctea. Y, si quisiéramos observar de manera directa un gravitón producido en otro lugar, tendríamos que construir un detector del tamaño de Júpiter y situarlo en órbita alrededor de una estrella de neutrones. Sin duda, nada de lo anterior se antoja viable en ningún futuro previsible.

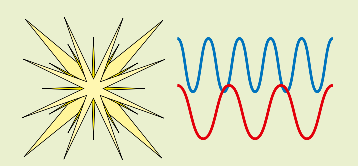
Tales estimaciones alimentaron la conclusión de que la investigación experimental en gravedad cuántica era imposible. Durante largo tiempo, mi razón para trabajar en la fenomenología de la gravedad cuántica no fue la esperanza de vivir el momento en que se midiesen los primeros efectos. Simplemente pensaba que, antes o después, alguien tenía que comenzar a investigar en esa dirección. Con el paso de los años, sin embargo, he llegado a la conclusión de que mi punto de vista inicial quizá fuese demasiado pesimista.

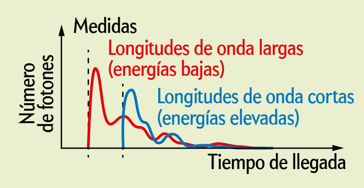
El argumento de que la gravedad cuántica no puede someterse a un juicio experimental porque los gravitones son muy difíciles de producir es demasiado corto de miras. De hecho, es posible investigar las propiedades cuánticas de una teoría sin necesidad de detectar por medios directos sus cuantos de interacción. En el caso de la electrodinámica cuántica, basta con la sencilla observación de que los átomos son estables: si la electrodinámica no fuese una teoría cuántica, eso no podría ocurrir nunca. Un electrón clásico debería emitir radiación electromagnética, con lo que el radio de su órbita alrededor del núcleo se reduciría paulatinamente hasta acabar colisionando con él. Por tanto, el simple hecho de que la materia sea estable nos está diciendo que la electrodinámica no puede quedar descrita por una teoría clásica. Para llegar a esta conclusión, no necesitamos detectar ningún fotón.

EFECTOS DE UN ESPACIOTIEMPO CUÁNTICO

Durante las últimas décadas se han explorado distintas vías para sondear de manera indirecta la naturaleza cuántica de la gravedad. Por desgracia, los diversos escenarios teóricos existentes no permiten derivar predicciones que den lugar a efectos medibles. Por ello conviene recurrir a lo que denominamos «modelos fenomenológicos»: estos permiten aventurar los efectos de ciertas propiedades genéricas que, presumimos,

Explosiones de rayos gamma



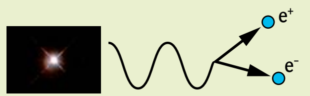


Observado: Los fotones de diferentes longitudes de onda se propagan a la misma velocidad

Posible efecto: La velocidad de los fotones depende de su longitud de onda; colores distintos llegan en momentos diferentes

Estrellas





Observado: Los fotones son estables

Posible efecto: El fotón puede desintegrarse al interaccionar con los defectos del espacio; la estrella parece menos brillante de lo esperado

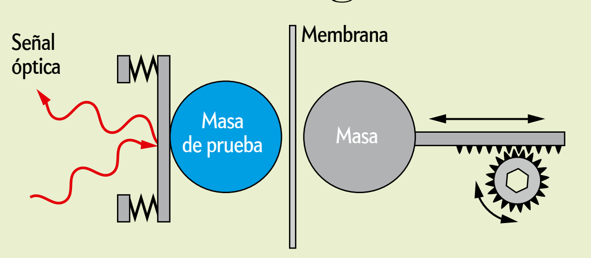
ha de exhibir la gravedad cuántica, como la existencia de una distancia mínima.

Si dicha longitud mínima se debiese a que el espaciotiempo adopta la forma de un retículo, entraríamos en contradicción con la teoría especial de la relatividad de Einstein. La razón es sencilla de entender: la relatividad especial predice la contracción de los objetos en movimiento, a la que sin embargo no podría estar sujeta la distancia mínima. Por tanto, si postulamos la existencia de un retículo, habremos de modificar la teoría de la relatividad, lo que tendría consecuencias observables. Una de ellas es que un electrón moviéndose en el espacio vacío debería perder energía debido a un «efecto Cherenkov del vacío». No obstante, este fenómeno no se ha observado nunca.

Hoy sabemos que la relatividad especial ha de satisfacerse con un enorme grado de precisión en cualquier teoría de gravedad cuántica. Por ello, la idea de que el espaciotiempo quede descrito por un retículo regular es muy probablemente incorrecta. En escenarios como la teoría de cuerdas o la gravedad asintóticamente segura, la distancia mínima aparece de forma diferente a como lo haría en un retículo, por lo que su comprobación experimental debe llevarse a cabo de otro modo. Por último, aún no está claro de qué manera se incorpora la relatividad especial en la gravedad cuántica de bucles.

OBSERVACIONES

La fuerza gravitatoria de un miligramo



Algunos avances en nanotecnología tal vez permitan medir la atracción gravitatoria generada por masas de pocos miligramos. Una propuesta reciente ha sugerido la posibilidad de transmitir gravitatoriamente el movimiento oscilante de un cuerpo (*gris*) a una masa de prueba (*azul*). Si esta última se aísla de influencias externas, sus vibraciones podrían detectarse por medios ópticos.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN MARKUS ASPELMEYER

Otro efecto potencialmente medible proviene de la idea de que el espaciotiempo se comporte como un fluido. De ser así, la luz experimentaría un efecto de dispersión, consistente en que los fotones de distinta frecuencia se propagarían en el vacío a velocidades diferentes. Esa variación en velocidad sería minúscula, pero podría observarse en fotones que hubiesen recorrido vastas distancias cósmicas, ya que en tal caso el retraso relativo entre ellos podría acumularse hasta tornarse medible. Este efecto puede buscarse en la radiación procedente de las explosiones cósmicas de rayos gamma, si bien hasta ahora no ha sido observado [*véase* «Pruebas de la invariancia de Lorentz a escala cósmica», por Alberto Fernández Soto; Investigación y Ciencia, abril de 2012].

Otra posibilidad consiste en fijarse en las fluctuaciones del espaciotiempo que deberían aparecer en una teoría cuántica de la gravedad. Por ejemplo, al estudiar cuásares muy lejanos, su imagen presenta un patrón de anillos de interferencia debido a la difracción que tiene lugar en la apertura del telescopio. Las fluctuaciones del espaciotiempo deberían difuminar dicho patrón, algo que de momento tampoco se ha detectado.

Aunque todo lo anterior pueda sonar muy negativo, no es poco lo que podemos aprender de la ausencia de datos experimentales. En particular, sabemos que la teoría correcta de la gravedad cuántica ha de ser tal que no dé lugar a ninguno de los efectos descritos arriba.

Según una propuesta muy reciente, debería ser posible comprobar si el espaciotiempo constituye una entidad física fundamental o si, por el contrario, es emergente. En este último caso, la estructura continua que presupone la teoría de la relatividad no podría ser una propiedad exacta. Como consecuencia, tendrían que aparecer defectos, análogos a los que surgen en un cristal. Estos habrían de ser extremadamente esporádicos tanto en el espacio como en el tiempo, ya que de otro modo entraríamos en conflicto con la relatividad especial. Sin embargo, su presencia podría detectarse en un difuminado de los anillos de interferencia, aunque solo para longitudes de onda muy largas. Por ahora, nadie ha intentado medir este efecto.

DE LA ASTRONOMÍA A LA ÓPTICA

En lugar de buscar nuevos fenómenos a bajas energías, también podemos intentar detectar efectos a energías muy elevadas, como las que tuvieron que producirse durante la gran explosión que dio origen al universo o las que esperaríamos encontrar cerca del centro de un agujero negro. Del cosmos primitivo aún nos llega el fondo de radiación de microondas, cuyas pequeñas inhomogeneidades de temperatura reflejan las variaciones en

la distribución de materia poco después de la gran explosión. En principio, esto no guarda ninguna relación con la gravedad cuántica. Pero, si el propio espaciotiempo fluctuase, dicho fenómeno podría haber dejado un rastro en el fondo de microondas. El origen de tales señales se hallaría en los gravitones que debieron abundar en el universo temprano. De esta manera, un examen minucioso de la radiación cósmica de fondo nos permitiría concluir si en aquellos momentos había gravitones y si, al menos en esa época, las propiedades cuánticas de la gravedad eran manifiestas.

Esta bella idea adolece, sin embargo, de dos problemas. El primero es que la impronta de los gravitones en el fondo de microondas parece ser demasiado débil para detectarla con los instrumentos actuales. En 2014, la colaboración BICEP2 anunció haber medido el efecto que las fluctuaciones del espaciotiempo del universo primitivo habrían dejado en la radiación cósmica de fondo. Poco después, sin embargo, los investigadores se percataron de que el fenómeno observado se debía a un efecto espurio causado por el polvo de la Vía Láctea. Con todo, los físicos siguen intentando encontrar una señal fidedigna. El segundo problema es que tales señales en el fondo cósmico resultan muy difíciles de distinguir de otras fluctuaciones aleatorias de origen no cuántico. En este sentido, se están empezando a desarrollar varios métodos de análisis para estudiar este tipo de datos.

Una idea altamente especulativa propone que los efectos de la gravedad cuántica serían directamente observables en caso de que la materia en colisión diese lugar a una singularidad «desnuda», en lugar de a una cubierta por un horizonte de sucesos, como ocurre en un agujero negro. Al menos, ciertas consideraciones teóricas y algunas simulaciones informáticas parecen indicar que tales fenómenos podrían tener lugar en la naturaleza. Que sean observables o no, así como sus posibles métodos de detección, son cuestiones que actualmente ocupan la atención de los investigadores.

Tal vez la aportación más interesante en los últimos años al problema de detectar los efectos cuánticos de la gravedad no proceda de la astronomía ni de la física de partículas, sino de la óptica cuántica. Gracias a varios avances tecnológicos recientes, hoy es posible preparar estados cuánticos con objetos de masas cada vez mayores, así como mantener tales estados aislados del entorno durante tiempos más y más largos. Esto último reviste gran importancia, ya que la interacción con el entorno provoca la destrucción del estado cuántico. Al mismo tiempo, también resulta factible medir fuerzas diminutas con una precisión cada vez mayor.

Por ejemplo, se ha logrado deslocalizar una pequeña lámina situada entre dos espejos usando para ello la presión de radiación de un láser. De esta manera, la lámina alcanza un verdadero estado cuántico caracterizado por la superposición simultánea de dos posiciones. Este experimento puede llevarse a cabo con masas de hasta un nanogramo. Por pequeña que nos pueda parecer, se trata de una masa gigantesca comparada con la de una partícula elemental. Entretanto, el grupo experimental de Markus Aspelmeyer, de la Universidad de Viena, ha desarrollado métodos que dentro de poco tal vez permitan medir la fuerza gravitatoria entre masas de tan solo un miligramo. Ello sería posible gracias a detectores microscópicos extremadamente sensibles fabricados con métodos nanotecnológicos muy recientes.

Hasta ahora nadie ha combinado estos avances para medir el campo gravitatorio producido por un estado cuántico con masa. La tarea se antoja difícil, ya que, recordemos, un miligramo es un millón de veces mayor que un nanogramo (10^{-9} gramos). Con todo, se trata de un área de investigación en rápido desarrollo [*véase* «Efectos cuánticos macroscópicos», Markus Aspelmeyer y Markus Arndt; Investigación y Ciencia, marzo de 2013, *reeditado para* «Fronteras de la física cuántica», colección Temas de IyC, n.º 86, 2016]. Por todo ello, considero factible que, de aquí a unos veinte años, podamos comprobar empíricamente si la gravitación presenta propiedades cuánticas. Hace solo una década, nadie pensaba que experimentos como los descritos aquí fuesen siquiera realizables.

Es cierto que las propuestas anteriores solo nos permitirían medir campos gravitatorios débiles, por lo que permaneceríamos dentro de los límites de la gravedad cuántica perturbativa. Por lo que respecta a la teoría completa, no aprenderíamos mucho. Con todo, un solo experimento exitoso en esta línea supondría apartar la gravedad cuántica del terreno de la filosofía y elevarla al grado de ciencia.

En la historia de la ciencia no faltan ejemplos de experimentos que, en su día, se consideraron imposibles de llevar a cabo. Tal fue el caso de la deflexión de los rayos de luz al pasar cerca del Sol o el de la detección de ondas gravitacionales. Por fortuna, el progreso técnico a largo plazo no se ha dejado intimidar por las actitudes pesimistas. Y es que, en ocasiones, los inventores inteligentes resuelven problemas de los que nada saben usando métodos que a los físicos nunca se les habrían ocurrido. IyC

PARA SABER MÁS

Minimal length scale scenarios for quantum gravity. Sabine Hossenfelder en *Living Reviews in Relativity*, vol. 16, 2013.
Phenomenology of space-time imperfection, II: Local defects. Sabine Hossenfelder en *Physical Review D*, vol. 88, art. n.º 124.031, diciembre de 2013.
A micromechanical proof-of-principle experiment for measuring the gravitational force of milligram masses. Jonas Schmöle et al. *Classical and Quantum Gravity*, vol. 33, art. n.º 125.031, mayo de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Gravedad cuántica. Bryce S. DeWitt en *IyC*, febrero de 1984.
Supercuerdas. Michael B. Green en *IyC*, noviembre de 1986.
Átomos del espacio y del tiempo. Lee Smolin en *IyC*, marzo de 2004.
El universo cuántico autoorganizado. Jan Ambjørn, Jerzy Jurkiewicz y Renate Loll en *IyC*, septiembre de 2008.
Geometría y entrelazamiento cuántico. Juan Maldacena en *IyC*, noviembre de 2015. Reeditado para *Fronteras de la física cuántica*, colección *Temas* de *IyC* n.º 86, 2016.





Juan Carlos Izpisúa Belmonte es profesor de investigación en el Laboratorio de Expresión Génica del Instituto Salk de Estudios Biológicos, en California.

ÓRGANOS HUMANOS FABRICADOS

BIOLOGÍA

Se están dando los primeros pasos hacia la creación de partes del cuerpo humano en el interior de cerdos, vacas y otros animales

Juan Carlos Izpisúa Belmonte

CADA AÑO, decenas de miles de personas en todo el mundo reciben órganos trasplantados. Aunque los conocimientos médicos sobre el trasplante han aumentado con rapidez, el número de donaciones de órganos se ha quedado a la zaga. Es difícil obtener las cifras globales, pero cada día una media de 16 personas en Europa y 22 en Estados Unidos mueren a la espera de un corazón, un hígado u otro órgano de repuesto. Además, la diferencia entre el número de personas que necesita un nuevo órgano y el de órganos disponibles para la donación sigue creciendo.

Una forma de paliar esa carencia consistiría en producir en el laboratorio órganos destinados al trasplante. Hace pocos años se creía que podría lograrse tal objetivo mediante el empleo de células madre, que pueden dar lugar a distintos tipos de tejidos, y de un soporte artificial sobre el que se formara el nuevo órgano. Sin embargo, los investigadores han hallado obstáculos a la hora de dirigir el desarrollo de las células madre de modo que produzcan un órgano humano totalmente funcional. Los estudios continúan en esta línea, pero el progreso ha sido muy lento.



PETER HORVATH

ASÍ SE GENERAN ÓRGANOS HUMANOS EN CERDOS

Los pasos de la técnica

Puede que los avances recientes en las técnicas basadas en células madre permitan algún día hacer crecer órganos humanos, como el páncreas o los riñones, en cerdos o en otros animales. La idea consiste en inyectar ciertos tipos de células madre humanas en embriones de cerdo especialmente tratados. A continuación, otros animales gestarían estos embriones quiméricos hasta que se pudieran extraer los órganos. Aunque hoy en día se está trabajando únicamente en las etapas iniciales (*1*, *2*, *3* y *4*), ya se tiene una idea de cómo debería funcionar el resto del proceso.

1 Se modifica la composición genética del óvulo fecundado

Se impide que un embrión de cerdo genere el páncreas eliminando el gen *Pdx1*; para ello se utiliza la enzima CRISPR/Cas9 a modo de tijeras genéticas.

Óvulo fecundado

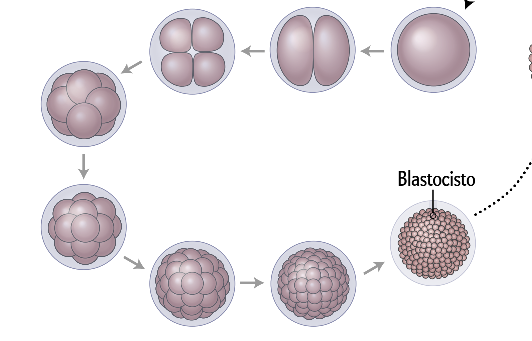
Gen *Pdx1*

Herramienta CRISPR

Cas9

2 Se deja que el óvulo fecundado alcance la etapa de blastocisto

Rodeado de una membrana protectora, el óvulo fecundado se divide en dos, cuatro y, después, en múltiples células.



CMPI humanas

3 Se inyectan células madre humanas en el blastocisto

Se introducen las denominadas células madre pluripotenciales inducidas (CMPI) en el embrión en desarrollo. El hecho crucial es que estas células contienen genes *Pdx1*, lo que significa que, después de todo, el embrión quimérico puede desarrollar un páncreas, pero formado por células humanas.

4 Se implanta el blastocisto quimérico en una hembra de cerdo

La mayor parte del desarrollo del embrión tiene lugar en otro animal.

Un pequeño pero creciente número de investigadores, entre los que me incluyo, creemos que podría existir otra estrategia: dejar que la naturaleza se encargue del trabajo difícil. La evolución ya ha creado un refinado proceso para convertir un puñado de células idénticas en cualquiera de los órganos y tejidos especializados que se necesitan para construir un organismo complejo entero, ya sea un ratón o un ser humano. Esta obra, plagada de virtuosismo, tiene lugar durante las semanas y meses que transcurren a medida que un óvulo fecundado da lugar a un embrión que crece y, sin tener que depender de ningún soporte artificial, se desarrolla hasta convertirse en un animal adulto con corazón, pulmones, riñones y otros tejidos perfectamente formados. Creemos que es posible hallar el modo de producir órganos a partir de animales, como el cerdo, que podrían destinarse a las personas.

Por supuesto, un corazón de cerdo normal no resultaría muy útil para alguien que necesitara un trasplante. Para empezar, nuestro sistema inmunitario rechazaría de forma abrumadora un implante directo de otra especie. (Las válvulas del corazón porcino pueden sustituir al tejido humano, pero solo después de haber sido sometidas a un tratamiento químico que evita esta reacción inmunitaria, un proceso que desbarataría el funcionamiento de un órgano complejo.) Algunos expertos opinamos que sería posible hacer crecer órganos humanos, compuestos total o casi totalmente por células humanas, en animales como cerdos o vacas. El animal resultante sería una quimera (una criatura en la que se combinan partes de dos especies), como el mítico grifo, que tiene la cabeza y las alas de un águila y el cuerpo de un león. Nuestro sueño consiste en crear una quimera inyectando células madre humanas en embriones animales escrupulosamente preparados, de modo que cuando se conviertan en adultos contengan algunos órganos formados por completo por células humanas. Tras sacrificar el animal, estaríamos en condiciones de aprovechar el corazón, el hígado o los riñones formados por células humanas y ofrecérselo a una persona que necesitara un trasplante.

La idea podría parecer descabellada, pero investigadores de Estados Unidos y Japón ya han demostrado que, en principio, es posible. Distintos grupos inyectaron células madre de rata en

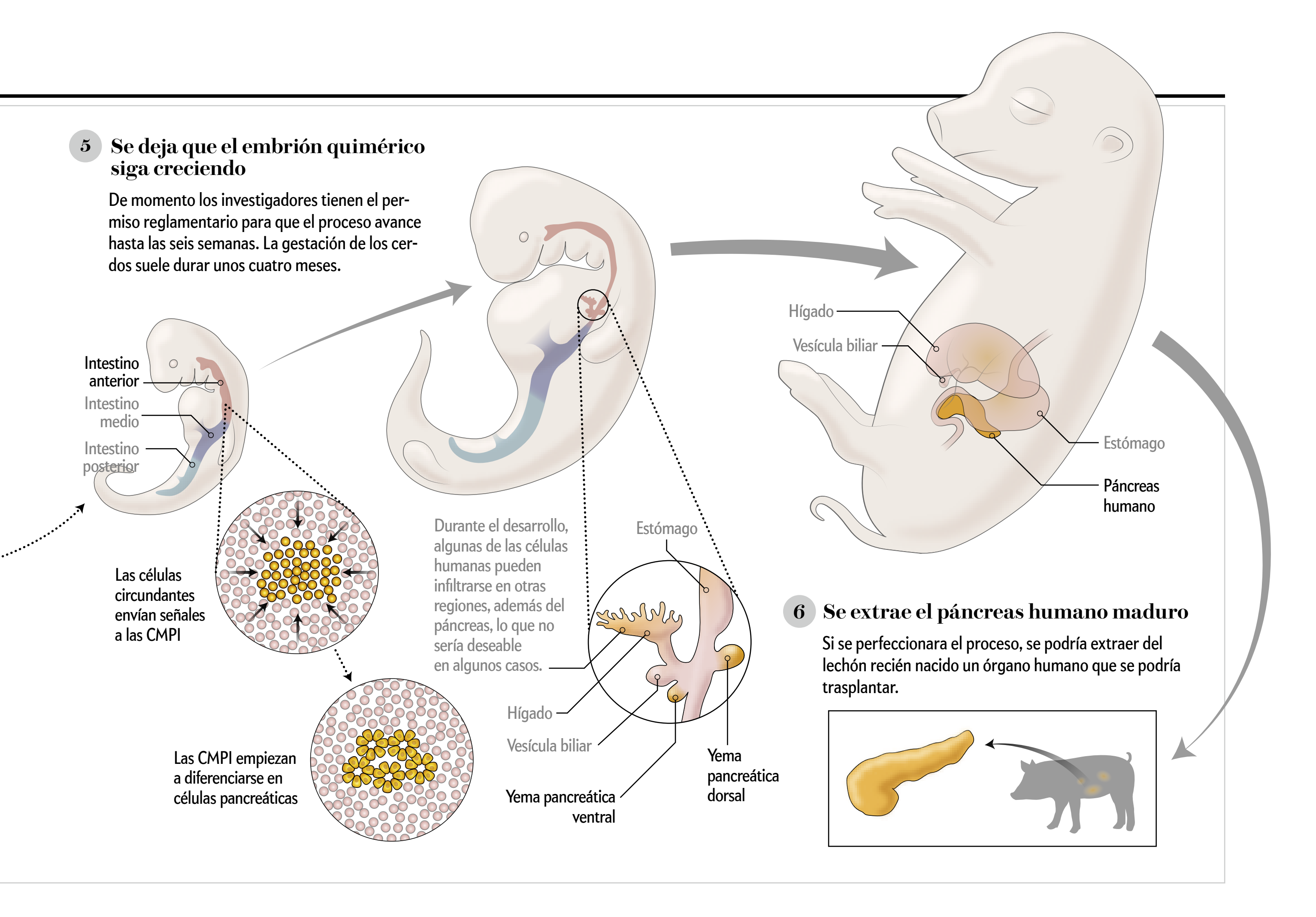
EN SÍNTESIS

Los biólogos están tratando de hallar la forma de hacer crecer órganos humanos en el interior de animales, como los cerdos, utilizando los últimos avances de las técnicas basadas en células madre. Tal logro podría reducir de forma espectacular la actual escasez de órganos para trasplantes.

La idea consiste en obtener células madre humanas e implantarlas, en las condiciones apropiadas, en embriones porcinos especialmente preparados de modo que el organismo resultante, denominado quimera, dé lugar a un animal con un páncreas, riñones, u otros órganos humanos.

Si los experimentos preliminares tienen éxito y los investigadores obtienen los permisos reguladores necesarios de las autoridades locales y nacionales, el objetivo consiste en dejar desarrollar del todo las quimeras (durante unos cuatro meses en el caso de los cerdos) para ver si generan órganos humanos que puedan trasplantarse.

GRÁFICO DE AMANDA MONTAÑEZ



embriones de ratón especialmente diseñados y, después, dejaron que las quimeras resultantes se desarrollasen dentro de madres sustitutas de ratón. Tras unas pocas semanas de gestación, las hembras gestantes dieron a luz a animales que parecían ratones y se comportaban como tales, salvo por el hecho de que tenían el páncreas de una rata. Mi laboratorio y otros grupos de investigación hemos dado un paso más al inyectar células madre humanas en embriones de cerdo. Un reducido número de estas inyecciones «prendieron» y pudimos confirmar que el tejido humano había empezado a madurar con normalidad. A continuación, transferimos los embriones quiméricos a madres sustitutas de cerdo y dejamos que se desarrollaran durante tres o cuatro semanas. Cuando finalicemos algunos experimentos intermedios adicionales, permitiremos que los embriones crezcan durante un par de meses y, en ese punto, determinaremos cuántas de sus células son de origen humano. En el caso de que estos experimentos tengan éxito —y que recibamos permiso de las autoridades locales y estatales para continuar— pretendemos dejar que los embriones se desarrollen por completo (lo cual, en el caso de los cerdos, tarda unos cuatro meses).

No estamos ni siquiera cerca de dar ese paso final que consiste en obtener cochinillos quiméricos. Todavía tenemos mucho que aprender sobre cuál es la mejor manera de preparar las células madre humanas y los embriones animales para que las quimeras permanezcan viables durante toda la gestación. Muchas cosas podrían salir mal. Pero incluso aunque no logremos producir órganos totalmente formados, las técnicas que vayamos descubriendo deberían ayudarnos a comprender mejor la aparición, progresión y desenlace clínico de numerosas enfermedades complejas y devastadoras, entre ellas el cáncer. En caso de tener éxito, esta estrategia podría tener una enorme repercusión en las terapias de trasplante de órganos. Las listas de espera podrían convertirse en algo del pasado a medida que vayamos desarrollando, a partir de animales de granja, un amplio repertorio de órganos de repuesto para decenas de miles de pacientes en todo el mundo.

APRENDIENDO DE LA NATURALEZA

Durante los últimos años, los biólogos hemos aprendido tanto sobre cómo crecen los embriones que hemos empezado tímidamente a configurar este proceso en función de nuestros intereses. También sabemos que gran parte de ese crecimiento viene guiado por la localización exacta de distintas células en las sucesivas etapas que atraviesa el organismo en desarrollo. Las células sintetizan y liberan proteínas especializadas denominadas factores de crecimiento que, a su vez, dependiendo de su concentración en diferentes regiones del embrión, activan y silencian numerosos programas genéticos internos. Basándonos en estos conocimientos aún incompletos y en un sinfín de ensayos y errores, nuestro laboratorio y otros centros estamos manipulando embriones de cerdo para que produzcan tejidos que, en última instancia, den lugar a un riñón humano, a un páncreas o a otro órgano.

Las materias primas que utilizamos incluyen óvulos y espermatozoides porcinos (extraídos de los animales) y células madre humanas (cultivadas en el laboratorio). Fecundamos un óvulo de cerdo con espermatozoides de cerdo y, unas pocas horas después, la célula resultante, que ahora se denomina cigoto, se

divide primero en dos y luego en cuatro células aparentemente idénticas. Cada una de ellas activa el mismo grupo de genes en su ADN, lo que da lugar a la producción de varias proteínas, las cuales, entre otras cosas, empujan a las células a que sigan dividiéndose.

Gracias a las complejas interacciones entre genes y proteínas, esas células antes idénticas pronto empiezan a moverse y a comportarse de forma distinta a medida que se van dividiendo. En unos pocos días, varios cientos de ellas han formado una suerte de esfera dentro de otra, lo que se conoce como blastocisto. Representa la última etapa en la que podemos inyectar células madre humanas, antes de que empiecen a formarse los tejidos especializados, denominados primordios, que posteriormente darán lugar a los órganos funcionales. Si esperamos más, el resto de las células madre del embrión huésped sencillamente ignorarán a las células madre foráneas que, a continuación se marchitarán y morirán.

A medida que el embrión crece, se van formando tres capas: una exterior, una intermedia y otra interna. Es en este momento cuando la localización exacta de cualquier célula dentro de esta estructura más amplia resulta más importante que nunca. Trabajos previos han demostrado que determinadas células de la capa interna responden a las señales proteicas de su microentorno y activan el gen *Pdx1*. Este paso, a su vez, pone en marcha otros genes que desencadenan la maduración del páncreas. Por el contrario, unas pocas células localizadas en la capa intermedia reaccionan a las señales externas y activan el gen *Six2*, con lo que comienza la formación de los riñones. Por tanto, aunque todas las células del organismo contienen las mismas secuencias de ADN, el entorno particular en el que se halla una célula durante una etapa concreta del desarrollo determinará qué genes se activarán y qué otros se desactivarán en ella y, por consiguiente, en qué tipo de tejido se convertirá.

El hecho de que un único gen, como *Pdx1* o *Six2*, pueda accionar toda una ruta que dé lugar a la formación de un páncreas o de los riñones reviste una enorme importancia para nuestras investigaciones. Mediante la eliminación del único gen que se necesita para el desarrollo de un páncreas (un proceso que hemos denominado «vaciar el nicho»), nuestro laboratorio ha creado embriones de cerdo que no generan el órgano productor de insulina a menos que inyectemos suficientes células madre humanas portadoras del gen que falta. Si las células añadidas se dividen del modo apropiado, darán lugar a un órgano maduro formado en su totalidad por células humanas. El resto del animal estará constituido, si todo va bien, por células porcinas.

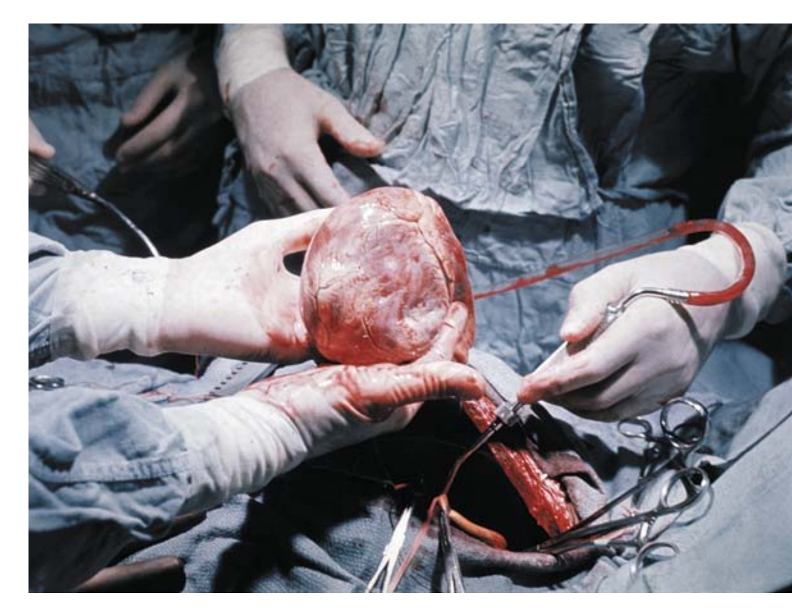
Como sucede en tantas otras ocasiones en ciencia, para hallar la forma exacta de vaciar un nicho embrionario y después rellenarlo con células madre de una especie distinta, primero tuvimos que llevar a cabo un gran número de experimentos con roedores. Por fin, en 2010, Hiromitsu Nakauchi, que por aquel entonces trabajaba en la Universidad de Tokio, y sus colaboradores publicaron que habían conseguido hacer crecer un ratón con un páncreas de rata. En tiempo más reciente, mi laboratorio ha logrado reprogramar genéticamente embriones de ratón para que utilicen células madre de rata que se diferencien en células de los ojos. Después de tres semanas de gestación en hembras de ratón, estos embriones se convirtieron en fetos de ratón con células de rata en sus ojos.

DIFICULTADES

Cada etapa de nuestro periplo exige que consideremos con atención los distintos problemas que pudieran surgir. Como los ratones son demasiado pequeños para generar órganos que tengan el tamaño adecuado para su uso en pacientes humanos, ahora hemos concentrado nuestros esfuerzos en la creación de embriones porcinos. Los cerdos y sus órganos pueden crecer hasta alcanzar casi cualquier tamaño que necesiten los cirujanos para hacer trasplantes en personas de diversa constitución. Estos animales también presentan un período de gestación más largo que los ratones (en estos últimos es de unos 20 días). Como los embriones humanos normales necesitan nueve meses para desarrollarse por completo, se están inventando ciertos trucos bioquímicos para ayudar a las células madre humanas a acelerar sus relojes internos de modo que maduren, o se diferencien, según la agenda del embrión huésped. Adaptar las células humanas al calendario algo más largo de los cerdos debería suponer menos esfuerzo que ajustarlo al de los ratones, que es mucho más breve.

Actualmente, mi equipo se ha centrado en hacer crecer un páncreas o un riñón formado por células humanas porque sabemos que su desarrollo en el embrión está dirigido por un único gen, lo que representa un proceso bastante directo. En cambio, otros órganos, como el corazón, pueden depender de varios genes para iniciar el proceso, lo que significa que vaciar el nicho para estos órganos requeriría la eliminación de más de un gen, una tarea bastante más difícil. Recientemente, el grupo de George Church, de la Universidad Harvard, ha modificado la herramienta de edición genética CRISPR/Cas9 para que elimine varios genes ubicados en distintas posiciones en el ADN de un embrión. De este modo, disponemos ahora de una estrategia que nos permitiría, si se diera el caso, llevar a cabo manipulaciones genéticas más complejas para crear otros órganos.

Asegurar que las células madre humanas que se utilizan sean suficientemente primigenias para que den lugar a cualquier tipo de tejido ha ofrecido mayores obstáculos. Los biólogos se refieren a este estado fisiológico como «indiferenciado». Podrían cumplir este papel las células madre embrionarias humanas, que se obtendrían a partir de los cigotos sobrantes generados en las clínicas de fecundación in vitro, aunque su uso desataría mucha controversia.



DONANTES HUMANOS: La supervivencia de los pacientes ha mejorado desde que se trasplantó este corazón en 1968, pero la escasez de órganos resulta mayor.

GETTY IMAGES

A lo largo de la última década, se han realizado una serie de avances técnicos que, a primera vista, parecía que iban a solucionar el dilema. Se ha descubierto cómo hacer que células maduras obtenidas de la piel o del intestino de un adulto se conviertan en un tipo de célula madre denominado célula madre pluripotencial inducida (CMPI). Ciertamente, hacer experimentos con CMPI en vez de con células madre embrionarias humanas resultaría más aceptable desde un punto de vista ético. Además, ofrecería la ventaja añadida de poder fabricar, algún día, órganos genética e inmunitariamente compatibles para cada paciente.

Sin embargo, un estudio más detallado sobre las CMPI humanas creadas hasta la fecha demuestra que no se hallan tan indiferenciadas como deberían para poder sobrevivir en el interior de un embrión quimérico. Se han adentrado tanto en el proceso que las lleva a convertirse en alguno de los diversos tipos celulares específicos, que ya no responden a ninguna de las señales bioquímicas del embrión que les indican que deben transformarse en otro tejido. Y puesto que estas CMPI no reaccionan correctamente, el embrión en desarrollo las considera ajenas y las expulsa.

Hace poco, Jun Wu, en mi laboratorio, ha empezado a tratar CMPI humanas con una combinación única de factores de crecimiento que permite que algunas de ellas, al menos, reaccionen adecuadamente a una gama más amplia de señales embrionarias. Hasta la fecha, nuestro grupo ha obtenido resultados preliminares que demuestran que las células obtenidas así pueden, de hecho, integrarse en blastocistos. De este modo, hemos logrado detener el crecimiento de los embriones experimentales a distintos tiempos después de la fecundación y los hemos analizado bajo el microscopio para comprobar si las células del huésped y las implantadas se mezclan bien. A continuación, nuestro plan consiste en permitir que los embriones se desarrollen un poco más, hasta que cumplan seis semanas y pueda observarse en ellos los primordios. Llegados a este punto, los embriones empezarán a generar los precursores de los diversos órganos y tejidos.

Sin embargo, aunque lográsemos generar CMPI humanas que se integraran por completo en los embriones porcinos, no estaríamos exentos de peligros. Los humanos y los cerdos no nos hallamos tan cerca, evolutivamente hablando, como los ratones y las ratas, que ya se han utilizado para crear animales quiméricos. Por consiguiente, las CMPI humanas quizá hayan perdido la capacidad de percibir todas las señales bioquímicas procedentes de una especie más distante desde un punto de vista evolutivo, como es el caso de los cerdos. Si no conseguimos dar con una estrategia bioquímica para salvar este obstáculo, tendríamos que empezar a ensayar nuestras ideas en otras especies, como las vacas.

LOS SIGUIENTES PASOS

En 2012 discutí esta y otras preocupaciones con mi colaborador Josep María Campistol, director general del Hospital Clínico de Barcelona, conocido internacionalmente por sus intervenciones de trasplante de órganos. Recuerdo muy bien su consejo: «La única forma de saber si las CMPI humanas pueden salvar la barrera específica y contribuir a la formación de un órgano humano en un cerdo es arremangarse y hacer el experimento».

Las palabras de Campistol me pusieron manos a la obra. Sabía que nuestro laboratorio no podría llevar a cabo esta tarea por sí mismo. Junto a embriólogos, veterinarios, biólogos especializados en células madre y bioéticos creamos un consorcio internacional para analizar nuestras ideas. Comenzamos en 2015 inyectando CMPI humanas en embriones porcinos. Estoy especialmente agradecido a la Universidad Católica San Antonio, en Murcia, y a la Fundación Moxie por el apoyo prestado en estas etapas iniciales del trabajo, cuando nadie pensaba que nuestra estrategia resultaría viable.

Hasta la fecha, la mayoría de nuestros experimentos se han llevado a cabo en California y en España, bajo la supervisión de agencias reguladoras locales y nacionales. De momento, hemos permitido la gestación de los embriones quiméricos humanos-porcinos en un cerdo hembra durante unas cuatro semanas, momento en el que se procede al sacrificio de los animales. (Las directrices que hemos acordado con las autoridades reguladoras exigen que sacrifiquemos tanto a la hembra gestante como a los embriones.)

En conjunto, los resultados obtenidos a partir de estos y otros experimentos nos han ayudado a obtener algunos conocimientos básicos sobre el desarrollo de los embriones quiméricos. Estamos empezando a determinar el número óptimo de CMPI humanas que hay que implantar para que el embrión se forme bien, así como el momento en el que tenemos que implantarlas. También hemos comenzado a trazar el recorrido que siguen las células humanas cuando empiezan a migrar hacia distintas regiones del embrión.

UN EQUILIBRIO ÉTICO

Al mismo tiempo que vamos perfeccionando nuestros procedimientos, nos vemos obligados también a trabajar con el gran público para afrontar los nuevos retos éticos, sociales y legislativos que van surgiendo en este campo emergente. Durante un año y medio, nuestro consorcio ha trabajado en estrecha colaboración con expertos en ética y reguladores, tanto en California como en España, para elaborar las directrices que rigen nuestra investigación.

No hace falta decir que acatamos la normativa estándar relacionada con el bienestar animal, que debería aplicarse a toda investigación con criaturas sensibles; esta persigue evitarles sufrimientos innecesarios y dotarles de un espacio vital adecuado en el que, entre otras cosas, puedan hacer ejercicio. Sin embargo, la técnica plantea otras preocupaciones adicionales que son específicas. Como ya he comentado, las células madre realmente indiferenciadas pueden generar cualquier tipo de tejido. Pero debemos prestar especial atención a tres tipos de ellos, a saber, el tejido nervioso, los espermatozoides y los óvulos, porque al humanizarlos en animales podrían dar lugar a criaturas que nadie quiere crear.

Imaginemos, por ejemplo, la pesadilla ética que supondría que el cerebro de un cerdo albergase suficientes células humanas como para que fuera capaz de llevar a cabo razonamientos de alto nivel. Podemos eludir ese problema eliminando el programa genético que dirige el desarrollo neural de todas las CMPI humanas antes de inyectarlas. Entonces, aunque dichas células lograsen migrar al nicho embrionario responsable del crecimiento del cerebro, no podrían seguir desarrollándose. Las únicas neuronas que lograrían hacerlo serían cien por cien porcinas.

Otro escenario que los investigadores desean evitar por razones que pronto quedarán claras es el cruce de animales quiméricos entre sí. Aunque remota, existe la posibilidad de que algunas de las células madre humanas que hemos implantado migren al nicho que da lugar al sistema reproductor, en vez de permanecer en el que genera el órgano deseado. Como resultado obtendríamos animales que producen esper-

matozoides u óvulos casi idénticos a los de las personas. Si, a continuación, permitimos que estos animales se crucen entre sí, nos podríamos encontrar con la éticamente desastrosa situación en la que dentro de un animal de granja empezara a gestarse un feto humano (resultante de la fecundación de un óvulo porcino humanizado por parte de un espermatozoide humanizado de otro cerdo). La mejor manera de evitar una consecuencia tan inquietante consiste en garantizar que cada animal quimérico utilizado para el trasplante se cree a partir de cero, es decir, a partir de la fecundación de óvulos porcinos con espermatozoides porcinos y la introducción posterior de las células madre humanas.

Por supuesto, nada de eso debería preocuparnos en el caso de que los obstáculos técnicos fuesen insuperables. Pero aunque fracasáramos a la hora de generar órganos funcionales para trasplantes, creo que el conocimiento y las técnicas que vayamos descubriendo por el camino resultarán tremendamente valiosos. Uno de los primeros campos que se verá beneficiado será, con toda seguridad, la investigación sobre el cáncer. Los estudios demuestran que numerosos tumores se desarrollan de forma incontrolada en un niño o en un adulto porque reactivan algunos de los genes (aunque no todos) que en algún momento permitieron que el embrión se convirtiese en un feto. Por tanto, cuanto mejor entendamos las señales celulares normales que permiten crecer a los embriones —y que les indican cuándo tienen que dejar de hacerlo— más posibilidades tendremos de persuadir a las células cancerosas a que abandonen su traicionera trayectoria.

Por supuesto, los científicos somos también humanos. Nos entusiasmamos con las nuevas ideas y con las novedosas formas de llevarlas a cabo. Y tal vez mostremos un optimismo excesivo acerca de las ventajas de nuestros descubrimientos, no solo en nuestro campo sino también para toda la humanidad. Pero los resultados preliminares que he presentado en este artículo me hacen ser moderadamente optimista sobre la posibilidad de generar órganos humanos a partir de embriones animales quiméricos en las dos próximas décadas.

PARA SABER MÁS

Ethical standards for human-to-animal chimera experiments in stem cell research. Insoo Hyun y col. en *Cell Stem Cell*, vol. 1, n.º 2, págs. 159-163, 16 de agosto de 2007. **www.cell.com/cell-stem-cell/fulltext/S1934-5909(07)00080-X**

Generation of rat pancreas in mouse by interspecific blastocyst injection of pluripotent stem cells. Toshihiro Kobayashi y col. en *Cell*, vol. 142, n.º 5, págs. 787-799, 3 de septiembre de 2010. **http://dx.doi.org/10.1016/j.cell.2010.07.039**

Dynamic pluripotent stem cell states and their applications. Jun Wu y Juan Carlos Izpisúa Belmonte en *Cell Stem Cell*, vol. 17, n.º 5, págs. 509-525, 5 de noviembre de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

El poder terapéutico de nuestras células. Konrad Hochedlinger en *IyC*, julio de 2010.

Retos de la medicina regenerativa. María José Barrero y Juan Carlos Izpisúa en *IyC*, noviembre de 2012.

Avances en medicina regenerativa. Ferris Jabr, Christine Gorman y Katherine Harmon en *IyC*, junio de 2013.

Una década de reprogramación celular. Megan Scudellari en *IyC*, octubre de 2016.



CONOCIMIENTO



CINCO COSAS QUE SABEMOS CIERTAS

COMPENDIO DE HECHOS IRREFUTABLES PARA ESTOS TIEMPOS EN QUE TANTO SE PASAN POR ALTO LOS HECHOS

LAS VERDADES CIENTÍFICAS siempre son provisionales hasta cierto punto. Antaño creíamos que los continentes permanecían fijos sobre la esfera terrestre; hogaño sabemos que se mueven. Pensábamos que el universo era estático; ahora sabemos que se expande. Dábamos por cierto que la margarina era más saludable que la mantequilla y que la terapia de restitución hormonal era idónea para un gran número de mujeres posmenopáusicas; ahora sabemos que no es tan simple.

ILUSTRACIONES DE RED NOSE STUDIO

EN SÍNTESIS

En años electorales, los colectivos negacionistas que rechazan el consenso científico sobre ciertas cuestiones, minoritarios pero nunca callados, suelen armar más alboroto.

Creemos que es buen momento para defender con rotunda vehemencia ciertas verdades científicas que, pese a estar perfectamente contrastadas, desatan extrañas polémicas en algunos círculos.

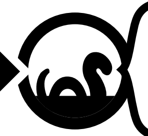
Tómese lo que sigue como unas chuletas para debatir con los anticientíficos.

Los científicos no lo saben todo, pero es mucho lo que sí saben. Y resulta desolador contemplar cuántas personas rechazan del modo más estrafalario algunas de las verdades más consolidadas y mejor contrastadas de la ciencia moderna.

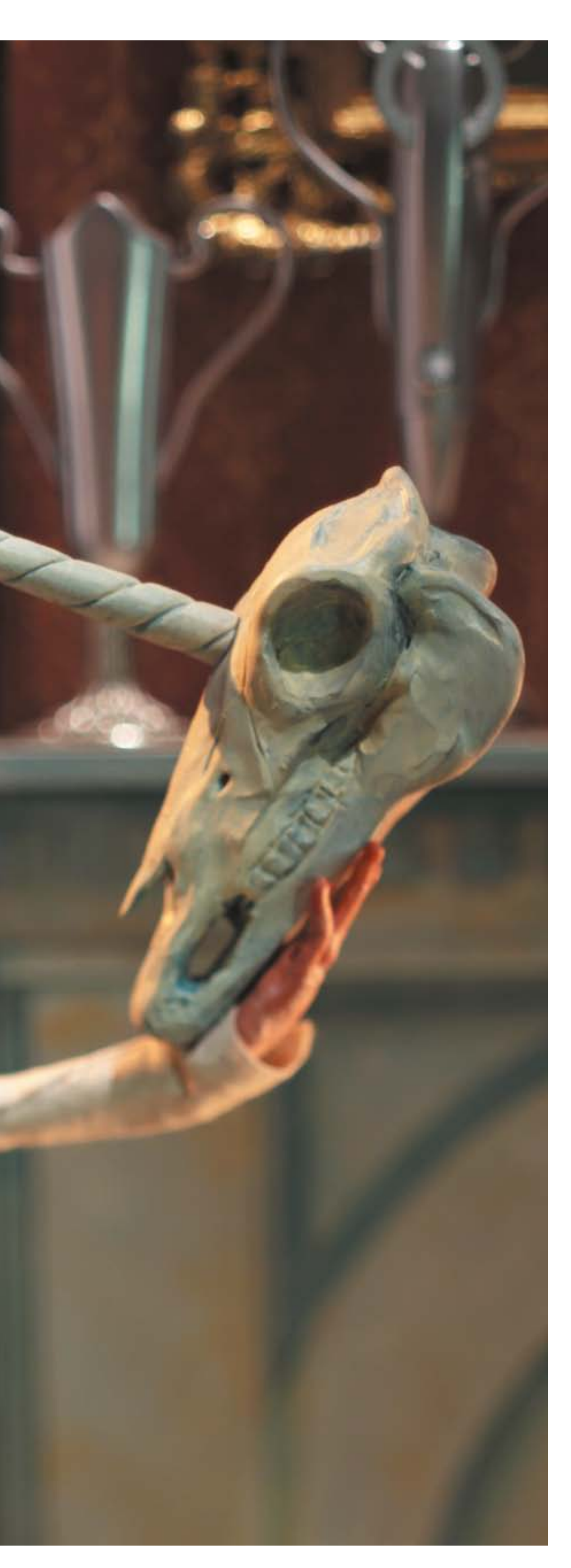
Por lo común informamos de los últimos avances científicos y técnicos, pero creemos que es conveniente dar un paso atrás y hablar de algunos hechos científicos sólidamente arraigados. En lo esencial, los científicos legítimos no debaten acerca de estas verdades fundamentadas en pruebas verificables, que, aceptadas desde hace mucho tiempo, no han cesado de ganar crédito con la acumulación de más y más pruebas.

La investigación psicológica ha mostrado que tener que enfrentarse con todo ese cúmulo creciente de pruebas endurece mucho la postura de los negacionistas. No pretendemos, pues, que las siguientes notas resuelvan el problema. Pero creemos que es nuestro deber recalcar que algunos hechos son rigurosamente ciertos, aun en un mundo donde la ciencia es cada vez más vasta y se halla en incesante evolución.

—La redacción



MONSTRUOS, S.A. **El abominable hombre de las nieves, el monstruo del lago Ness y otras criaturas similares no existen. La idea de que bestias desconocidas merodean por los bosques del noroeste de Norteamérica, surcan las frías aguas escocesas y campan por el Himalaya tiene el encanto de lo misterioso e inquietante, pero las pruebas son prácticamente nulas.**



La evolución es la única explicación razonable para la diversidad de la vida en la Tierra

MICHAEL SHERMER

EL 14 DE ENERO DE 1844 CHARLES DARWIN rememoraba su viaje alrededor del mundo a bordo del *HMS Beagle* en una carta dirigida a su amigo Joseph Hooker. Tras pasar cinco años en el mar y siete en casa meditando sobre el origen de las especies vivientes, esta fue su conclusión: «Por fin vislumbro atisbos de luz, y estoy casi convencido —muy al contrario de mi opinión primera— de que las especies no son —y esto es como confesar un asesinato— inmutables».

Como confesar un asesinato. Dramáticas palabras. Pero no hace falta ser ingeniero espacial —o naturalista inglés— para entender que una teoría sobre el origen de las especies por obra de la selección natural desataría una enorme controversia. Si las nuevas especies se crean de forma natural —y no sobrenatural—, ¿qué papel desempeña en todo ello Dios? No sorprende que, más de siglo y medio después, a los creyentes de algunos credos religiosos les siga pareciendo una teoría terriblemente transgresora. Pero en los años transcurridos son tantas las pruebas favorables recabadas por los científicos que sería asombroso que resultase no ser cierta: tan turbador como que la teoría de los gérmenes como causa de enfermedades se viniese abajo, o como si a los astrofísicos no les quedase más remedio que abandonar el modelo de la gran explosión como explicación del origen del universo. ¿Por qué? Porque en ellas convergen las pruebas aportadas por múltiples ámbitos y líneas de investigación.

Un ejemplo: la comparación de los datos provenientes de la genética de poblaciones, la geografía, la ecología, la arqueología, la antropología física y la lingüística desveló que los aborígenes australianos están más cerca genéticamente de los sudasiáticos que de los negros africanos, lo cual tiene sentido desde la perspectiva evolutiva puesto que la ruta migratoria emprendida por el hombre cuando partió de África lo condujo primero a Asia y luego a Australia.

La concordancia de las técnicas de datación nos hace también confiar en la certidumbre de la teoría. Las dataciones con uranio-plomo, rubidio-estroncio y potasio-argón, entre otras, coinciden razonablemente en la edad de las rocas y los fósiles. Los valores de la antigüedad se dan como estimaciones, pero los márgenes de error rondan el 1 por ciento. No puede ocurrir que, si un científico determina que un fósil de hominino tiene 1.200.000 años, otro calcule que apenas alcanza los 10.000.

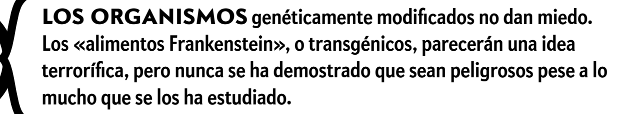
No solo son congruentes los datos, sino que los fósiles muestran además estadios intermedios, cuya existencia niegan los antievolucionistas. Ya se conocen al menos seis estadios fósiles intermedios en la evolución de las ballenas, por ejemplo, y más de una docena de homininos fósiles, varios de los cuales deben de haber sido estadios intermedios entre la separación de los homininos de los chimpancés acaecida hace seis millones de años y la aparición de los seres humanos. Por su parte, los estratos geológicos revelan una y otra vez la misma secuencia de fósiles. Los trilobites y los mamíferos quedan separados por muchos millones de años, así que hallar un caballo fósil en el mismo estrato geológico que un trilobites —o, aún más radical, descubrir un hominino en el mismo estrato que un dinosaurio— resultaría problemático para la teoría de la evolución, pero nunca ha ocurrido.

Por último, los vestigios anatómicos son una señal de la historia evolutiva. La serpiente cretácica *Pachyrhachis problematicus* posee unas pequeñas patas traseras que han desaparecido en casi todas las serpientes actuales. Las ballenas modernas conservan una pelvis minúscula, para las extremidades posteriores que sus antecesores terrestres poseyeron. De forma similar, las aves que no vuelan aún conservan las alas. Y, por supuesto, el ser humano luce abundantes vestigios, claros indicios de su origen evolutivo: las muelas del juicio, los pezones masculinos, el vello corporal, el apéndice y el coxis.

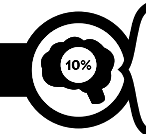
Tal y como apuntó el gran genetista y teórico evolutivo Theodosius Dobzhansky en una frase ahora célebre: «Nada tiene sentido en biología si no es a la luz de la evolución».



Michael Shermer es el editor de la revista *Skeptic*, columnista de *Scientific American* y miembro honorario (*presidential fellow*) del claustro de la Universidad Chapman. Se le puede seguir en Twitter: @michaelshermer



LOS ORGANISMOS genéticamente modificados no dan miedo. Los «alimentos Frankenstein», o transgénicos, parecerán una idea terrorífica, pero nunca se ha demostrado que sean peligrosos pese a lo mucho que se los ha estudiado.



100 % FILFA. No, no usamos solo el 10 por ciento de nuestra capacidad cerebral. Ni siquiera se sabe de dónde salió este «hecho», que no tiene el menor sentido.



La homeopatía carece de fundamento científico

HARRIET HALL

LA HOMEOPATÍA ES UNA DOCTRINA MÉDICA que asegura que trata las enfermedades con dosis ínfimas de sustancias que en toda persona sana provocarían síntomas de la dolencia en cuestión. Está basada en las creencias acientíficas de una sola y errada persona, el médico alemán Samuel Hahnemann, que la ideó a inicios del siglo XIX.

La homeopatía no solo no funciona: es imposible que lo haga. Es incompatible con los fundamentos básicos de la física, la química y la biología. Oliver Wendell Holmes la desenmascaró por completo en 1842 con el ensayo *Homeopathy and its kindred delusions* [La homeopatía y otras falacias afines]. Se habría quedado estupefacto de saber que en 2017 aún cuenta con adeptos.

Pocos usuarios de la homeopatía se han tomado la molestia de informarse acerca de lo que hablan o sobre las chifladas ideas en que se basa. Nos serviremos del siguiente ejemplo para explicar del modo más sencillo la doctrina homeopática: si el café le mantiene despierto, el café diluido le hará dormir; y cuanto más diluido, tanto mayor será el efecto somnífero. Todavía mejor: si se diluye hasta que no quede más que una molécula de café, el efecto será más potente si cabe. (De alguna forma, el agua recordará el café que ya no está ahí.) Si se hace gotear el agua, ya sin café, sobre una pastilla de azúcar y se deja evaporar, el recuerdo de la negra infusión se transferirá a la pastilla, que a partir de entonces aliviará el insomnio. Nada de esto tiene ningún sentido.

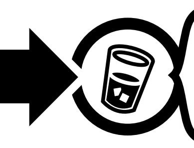
Cabe pensar que nadie compraría un medicamento que no contuviese principio activo alguno, pero sí, se compran. Oscillococcinum se halla a la venta en la mayoría de las farmacias. En Estados Unidos factura 15 millones de dólares al año. Los clientes adquieren este producto con la esperanza de que alivie los síntomas gripales y catarrales. Su nombre responde al de la bacteria oscilante que un galeno francés, Joseph Roy, creyó ver en la sangre de personas aquejadas por la gripe y en el hígado de pato. Nadie más la veía. La caja especifica que el principio activo es *Anas barbariae* 200 CK HPUS. A saber: pato criollo (corazón e hígado) diluido en una razón 1:100, proceso que se repite 200 veces sometiéndolo a «sucusión» (agitación) después de cada dilución (ya se sabe: «agitado, no revuelto»). Cualquier estudiante de química sabrá recurrir al número de Avogadro para averiguar que tras la decimotercera dilución hay una posibilidad de 1 entre 2 de que quede una sola molécula de pato, por lo que al llegar a la bicentésima ya será historia.

Los homeópatas prescriben tratamientos increíblemente absurdos. Formulan una sarta de preguntas que no vienen a cuento (de qué color son sus ojos, qué alimentos no le gustan, a qué le tiene miedo). Consultan dos libros. El primero es *Repertorio*, la lista de los remedios para todo posible síntoma, por ejemplo, la clarividencia —sí, se considera un síntoma—, la caries dental o la «llorera» (sic). El segundo se titula *Materia Medica*, la lista de los síntomas asociados con cada remedio —¡«Soñar con atracadores» está vinculado con la sal de mesa!—. En efecto, la sal de mesa diluida y casi cualquier otra cosa imaginable pueden ser un remedio. Algunos de mis favoritos: el muro de Berlín, la luz de luna eclipsada, el cerumen de

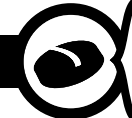


Harriet Hall, médico de familia retirada, escribe sobre medicina, remedios alternativos, ciencia, charlatanería y pensamiento crítico. Es una de las fundadoras y responsables del blog *Science-Based Medicine*, pertenece al Comité para la Indagación Escéptica y es miembro de la junta directiva de la Sociedad para la Medicina Científica.





ESTA IDEA HACE AGUAS. No es necesario beber ocho vasos de agua al día. Hay que restituir el líquido perdido a través de la orina y el sudor, pero los alimentos también lo contienen: no hay una cantidad prefijada.



ORINA CARA. A no ser que se padezca una carencia o no se pueda disponer de alimentos saludables o una alimentación equilibrada, los suplementos vitamínicos son casi una absoluta pérdida de tiempo y dinero.

perro y el polo sur de un imán. Es absurdo, pero se calcula que solo en Estados Unidos cada año cinco millones de adultos y un millón de niños toman medicamentos homeopáticos. En su mayor parte por iniciativa propia y comprados en la farmacia.

Existen estudios que defienden la eficacia de la homeopatía, pero es posible hallar un estudio que sustente casi cualquier cosa y las revisiones científicas rigurosas del conjunto de las investigaciones al respecto concluyen una y otra vez que su efecto no es más que el propio de un placebo. Como Edzard Ernst, profesor emérito de medicina complementaria de la Universidad de Exeter y el divulgador Simon Singh han escrito: «Las pruebas llevan a pensar que se trata de una industria falaz que no ofrece a los pacientes más que fantasías».

La Administración de Alimentos y Fármacos de EE.UU. permite la venta de remedios homeopáticos gracias a una cláusula del «abuelo» (una cláusula de derechos adquiridos) que los exime del requisito de demostrar su efectividad. Con todo, parece que la regulación está cambiando: desde fecha reciente la Comisión Federal de Comercio estadounidense exige que estos productos informen a los consumidores de que no hay evidencias científicas de su eficacia y que las indicaciones alegadas se basan en teorías del siglo XVIII que no son aceptadas por la mayoría de los expertos médicos actuales.

La pervivencia de la homeopatía demuestra la incapacidad del gran público para pensar críticamente. La gente la ha estado tomando como sustituta de fármacos, vacunas o antipalúdicos, con resultados desastrosos. Algunos ya no pueden contarlo. La homeopatía era pura charlatanería en 1842 y sigue siéndolo hoy. A estas alturas deberíamos saberlo de sobras.



Las teorías que califican de conspiración el cambio climático son absurdas

RAY PIERREHUMBERT

SIEMPRE ME DESCONCIERTA VER GENTE convencida de que el consenso científico que sustenta el calentamiento global de origen humano es un gran complot que pretende acabar con el estilo de vida estadounidense, una patraña socialista destinada a las masas desprevenidas o... escriba aquí su pretexto favorito.

Si es una conspiración, resulta de veras notable: abarca casi dos siglos y están en el ajo científicos de docenas de naciones. El fundamento que permite entender la temperatura del planeta lo constituyen los trabajos realizados por Joseph Fourier en la segunda década del siglo XIX; con ellos dejó establecido que la temperatura viene dada por el balance entre la energía recibida del Sol y la radiación infrarroja emitida de nuevo al espacio. La cuantificación de la idea básica de Fourier nace con la teoría de la radiación concebida cuatro décadas más tarde por Ludwig Boltzmann y su coetáneo Gustav Kirchhoff. A finales de siglo, John Tyndall introdujo en la ecuación el dióxido de carbono al demostrar que este atrapa la radiación infrarroja. Y Svante Arrhenius vino a unir todas las piezas poco después.

En el siglo XX se sucedieron numerosos avances que culminaron en una teoría que incorporaba tanto el dióxido de carbono como el vapor de agua. La concibió en los años sesenta y setenta Syukuro Manabe, mientras trabajaba en el laboratorio de dinámica de fluidos geofísicos de la Administración de los Océanos y la Atmósfera de EE.UU. (NOAA). Desde entonces hemos aprendido mucho, pero Manabe resolvió el problema en lo esencial. Nuestro conocimiento de la relación entre los gases de efecto invernadero y el calentamiento global descansa en los mismos principios que rigen el funcionamiento de los misiles termodirigidos, los satélites meteorológicos y los telemandos por infrarrojos. Menuda conspiración haría falta para simular todo eso.

Aún mayor sería la conjura para falsear los cambios del clima que predice la teoría y que ya se han observado, como son el aumento de la temperatura media global, el ascenso del mar, la fusión de los casquetes polares, el retroceso de los glaciares o las olas de calor de creciente intensidad y duración, por citar algunos. La camarilla tendría además que falsificar los datos paleoclimáticos que nos advierten de que no hay mecanismos mágicos (nubes o lo que sea) que nos salven de los efectos acreditados del dióxido de carbono en concierto con los del vapor de agua. Habría que falsificar las observaciones que nos dicen que las aguas subsuperficiales de los mares se están calentando y que, por tanto, la fuente de calor que provoca el calentamiento del planeta no procede de ellos (la energía se conserva, así que si la energía causante del calentamiento de la superficie terrestre procediese del mar, este se estaría enfriando como consecuencia. Conservar no es meramente una virtud personal: ¡es la ley!). De manera similar, los datos relativos a los isótopos de carbono y al balance de este elemento químico prueban que el dióxido de carbono que se está acumulando en la atmósfera procede de la deforestación y de la quema de los combustibles fósiles. Habría que simular la conjunción observada del enfriamiento estratosférico con el calentamiento troposférico, característico de la influencia en la atmósfera del dióxido de carbono y otros gases de invernadero de vida larga. Y la lista sigue y sigue.

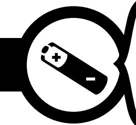
La ciencia premia a quienes derrocan el dogma anterior (piénsese en la mecánica cuántica frente a la clásica). Así pues, que la teoría del calentamiento global antropogénico haya capeado todas las dificultades desde que surgiera en su forma moderna en los años sesenta dice mucho. El calentamiento global es un problema que ha causado la humanidad. Dudar de ello no tiene cabida en un discurrir cuerdo.



Ray Pierrehumbert ocupa la cátedra Halley de física de la Universidad de Oxford.



¡CUIDADO CON EL BORDE! **No se preocupe, es una broma. La Tierra no es plana. Cristóbal Colón lo sabía cuando zarpó. Ustedes también lo saben. O debieran...**



NADA ES GRATIS. **La energía gratuita y el movimiento perpetuo suenan muy bien, pero la termodinámica dice que no hay forma posible, y esa es la ley.**

Las vacunas no causan autismo

PAUL OFFIT

HAN PASADO CASI VEINTE AÑOS desde que se publicara en *Lancet* un artículo del que nacería la idea de que las vacunas causan autismo. Desde entonces, más de dos docenas de artículos han refutado que sea así y el artículo original ha sido retirado.

En su mayor parte, el dinero y el tiempo dedicados a estudiar la hipótesis de la vacuna y el autismo han merecido la pena. Para empezar, los medios informativos ya no hablan de ella con la falsa cantinela del equilibrio, es decir, afirmando que hay dos bandos cuando solo uno se sustenta en el rigor científico. Ahora la historia va de una aseveración desacreditada propuesta por un médico desacreditado. En segundo lugar, la mayoría de los padres no cree ya que las vacunas causen autismo. Según un estudio reciente, el 85 por ciento de los progenitores con hijos autistas no cree que sean la causa.

Por desgracia, pese a la montaña de pruebas que refutan el vínculo, un pequeño grupo de padres cree todavía que las vacunas podrían causarlo. Que se nieguen a vacunar no solo pone a sus hijos en peligro, sino que debilita la «inmunidad colectiva» que frena la propagación de los brotes infecciosos. Hay varias razones verosímiles de que crean así.

Una de ellas es que seguimos ignorando la causa o las causas del autismo. Sucedía lo mismo con la diabetes en el siglo XIX: no se sabía qué la motivaba ni cómo tratarla. Se propusieron causas absurdas y curas heroicas. Pero en 1921 Frederick Banting y Charles Best descubrieron la insulina y todas esas falsas creencias se desvanecieron. Mientras no surjan una causa y una cura claras para el autismo, difícil será enterrar para siempre la hipótesis de la vacuna.

Otra posible razón es que culpar a las vacunas del autismo resulta confortante. Sin duda, más que los estudios que apuntan a su origen genético. Si el autismo responde a una causa externa al vientre materno, los padres pueden ejercer alguna forma de control. Si es genético, no hay tal.

Y a quién no le gusta un hombre de paja. Está muy bien poder señalar con el dedo a un interés perverso como origen del autismo, sobre todo si se trata de las grandes farmacéuticas o el Gobierno. Los teóricos de la conspiración sostienen que la única razón de que los estudios aseguren que las vacunas no causan autismo es que una gran trama internacional está ocultando la verdad. Aunque solo un pequeño grupo de padres mantiene tal creencia, su voz retumba con un eco exagerado a través de Internet.

Por último, a los padres con hijos autistas les suele parecer que crecieron con normalidad hasta el primer año de vida, más o menos. Entonces, después de recibir una serie de vacunas, el niño dejó de alcanzar los hitos en el habla, el lenguaje, el comportamiento y la comunicación que son propios del segundo año. Varios estudios que han examinado grabaciones de vídeo tomadas en el primer año han constatado que tales niños ya mostraban indicios de desarrollo anómalo. Pero a ojos de los padres, eran normales.

La cara positiva de la polémica desatada en torno a las vacunas y el autismo ha sido la irrupción en Internet, las ondas y la prensa de miembros del mundo académico, médicos, responsables sanitarios y padres que han actuado como representantes de la ciencia que exonera a las vacunas. Gracias a ellos, las tornas han cambiado. Ahora oímos la voz en alto de padres enojados porque otros iguales han puesto en riesgo a todos los niños al no vacunar a sus hijos.

Este clamor colectivo en defensa de las vacunas adquirió una inmediatez mayor en EE.UU. con el brote de sarampión acaecido en 2015, iniciado en el parque temático de Disney del sur de California y que afectó a 189 personas, en su mayoría niños, de 24 estados del país y el distrito de Columbia. Por desgracia, nada educa mejor que un virus. Aunque una y otra vez sean los niños quienes paguen nuestra ignorancia.

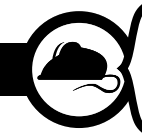


Paul Offit es profesor de pediatría de la División de Enfermedades Infecciosas y director del Centro de Educación Vacunal del Hospital Infantil de Filadelfia.





SE HA VISTO UN CRIMEN. O más bien no se ha visto. La actividad criminal no aumenta durante la luna llena. Puede parecer lo contrario, incluso a la policía, porque se tiende a percibir todo aquello que confirma las expectativas propias. Sin embargo, pese a un puñado de estudios de aspecto sospechoso, la mayoría de las investigaciones dicen que la idea es lunática.



RATATOUILLE. Es mucho más seres humanos. Los ensayos nuevos. Pero si usted oye que recele, pues seguramente hay



MILLONES DE TESTIMONIOS AFIRMAN en Estados Unidos que han sido abducidos por alienígenas, según un artículo publicado en 2013 por el *Washington Post*. Impresionante logro este, que se apuntan los extraterrestres. Sin duda contrasta con la tibia reacción del Gobierno. De todo esto debería usted deducir que o bien Washington cree que no está pasando tal cosa, o bien que es parte de la trama.

No hay indicios creíbles de que haya habido visitas de extraterrestres

SETH SHOSTAK

Muchos creen lo segundo. Aseguran que el Gobierno sabe que los hombrecillos verdes están aquí, pero guarda celosamente las pruebas en el Área 51 o en algún otro enclave secreto.

Aguarde un momento. A no ser que los alienígenas prefieran a los estadounidenses —y, dejando aparte el excepcionalismo americano, ¿por qué iban a preferirlos?—, el porcentaje de abducciones en el mundo entero no sería muy diferente al de Estados Unidos. Suponiendo que Extraterrestres Sin Fronteras estuviese manos a la obra, decenas de millones de personas habrían sido raptadas por ellos en todo el planeta. Creo que las Naciones Unidas se habrían dado cuenta. Creo que usted se habría dado cuenta.

Las abducciones, claro está, solo son un componente más del fenómeno OVNI. En su mayor parte, los indicios son avistamientos: relatos de testigos, fotos y vídeos. Casi todos tienen explicación: aviones, cohetes, globos sonda, planetas brillantes o, de vez en cuando, tomaduras de pelo. A algunos no se les halla explicación, pero eso solo quiere decir que siguen siendo una incógnita, no que sean platillos volantes, por convencidos que estén los relatores. Hoy en día, no hay ningún indicio científicamente validado de que los extraterrestres nos hayan visitado, hace poco o en el pasado remoto. Las pirámides, las líneas de Nazca en Perú y los demás artilugios que se han atribuido a visitantes siderales de la Antigüedad se pueden explicar sin mayores problemas como obra del hombre.

Y lo cierto es que pocos son los científicos o conservadores de museos de ciencia que creen en la posibilidad de que nos puedan haber visitado. Aun dejando de lado las formidables dificultades técnicas que entrañan los viajes interestelares, pregúntese esto: ¿por qué aquí y ahora? *Homo sapiens* solo lleva delatando su presencia al universo desde la aparición de las transmisiones de televisión y del radar. A no ser que los extraterrestres provengan de un sistema solar muy cercano, no ha transcurrido el tiempo suficiente para que se percaten de nuestra existencia y viajen hasta la Tierra. Aunque pudiesen venir hasta aquí a la velocidad de la luz —y no podrían—, tendrían que vivir como mucho a unos 35 años luz de nosotros, y no es que haya muchas estrellas tan cerca. Además, los viajes por el espacio a gran velocidad exigirían ingentes cantidades de energía. ¿Pagaría usted una faraónica factura eléctrica solo por pescar y volver a soltar unos cuantos seres humanos?

No obstante, desde hace décadas las encuestas arrojan que cerca de un tercio de la gente cree que nuestro mundo recibe a visitantes cósmicos. Si pese a la falta de indicios dignos de crédito usted insiste en que es cierto, forzoso será reconocer que son mejores invitados de lo que nosotros lo hayamos sido nunca. No nos destruyen, no siembran la discordia, ni siquiera roban los cubiertos de plata. El incidente de Roswell se remonta a hace casi setenta años. Si han estado por aquí desde entonces, merecen una medalla por su buena conducta.



Seth Shostak es astrónomo del Instituto SETI, organización sin ánimo de lucro que estudia la naturaleza de la vida extraterrestre. Es además uno de los presentadores del programa de radio semanal *Big Picture Science*.

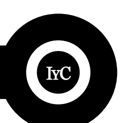
PARA SABER MÁS

Why evolution is true. Jerry A. Coyne. Penguin Books, 2010.
Global weirdness. Climate Central. Vintage Books, 2012.
The panic virus: The true story behind the vaccine-autism controversy. Seth Mnookin. Simon & Schuster, 2012.
America's science problem. Shawn Lawrence Otto en *Scientific American*, noviembre de 2012.
How UFOs conquered the world: The history of a modern myth. David Clarke. Aurum Press, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Correlación no implica causalidad. Bartolo Luque en *IyC*, julio de 2016.

fácil curar el cáncer en los roedores que en los con animales han propiciado muchos tratamientos llega una cura basada en lo visto con roedores, gato encerrado.



ECOLOGÍA

SALVAR LA BIODIVERSIDAD DE BIRMANIA

LOS CONSERVACIONISTAS APUESTAN POR EL ECOTURISMO PARA PRESERVAR LA NATURALEZA DEL PAÍS, PERO DEBEN HACER FRENTE A NUMEROSAS DIFICULTADES

Rachel Nuwer




GLOBOS AEROSTÁTICOS sobrevuelan los templos de Bagan en Birmania.

UNA DESPEJADA TARDE DE ENERO,



Rachel Nuwer es periodista científica. Escribe para publicaciones como *Scientific American, New Scientist* y *New York Times*.

dos turistas se montan en sendos kayaks amarillo chillón y salen a explorar el lago birmano Indawgyi, una de las masas de agua dulce más límpidas del sudeste asiático. Sus calmadas aguas reflejan con nitidez los humedales herbáceos que lo bordean y las montañas boscosas que despuntan en la distancia. La silueta dorada de la pagoda Shwe Myitzu, un destino de peregrinación para los budistas locales, solo accesible en barca la mayor parte del año, reluce en el horizonte como un espejismo. Como si se tratara de un área sagrada, hablar en ese lugar es casi tabú. Solo el leve chapoteo de los remos rompe el silencio abrumador que envuelve a los aventureros.

No es difícil que Birmania, el país más extenso del sudeste asiático continental, sobrecoja al visitante. Varias décadas de gobierno bajo el mando de una brutal junta militar dejaron tras de sí inmensas áreas naturales sin explorar y subdesarrolladas. Con una superficie menor que la de Texas, Birmania presenta ocho tipos de ecosistemas que abarcan desde deltas cubiertos por manglares hasta montañas nevadas. Gran parte de su legado natural se conserva extraordinariamente inalterado, en particular si se compara con el de las cercanas Tailandia, Malasia, India y China. Birmania alberga el mayor número de especies de aves del sudeste asiático (más de mil) y 250 especies de mamíferos, de las cuales siete no habitan en ningún otro lugar del planeta. Cada misión que se adentra en un área inexplorada de jungla o de arrecife coralino parece suponer el descubrimiento de una nueva especie. Tan solo en los últimos años se han hallado 14 reptiles y anfibios, un buen número de peces de agua dulce, un murciélago, un primate y el ciervo más pequeño del mundo.



GRACIAS al aislamiento político y económico, la vida silvestre de Birmania se ha conservado en buen estado, en comparación con la de sus países vecinos.

Sin embargo, Birmania está cambiando a ritmo acelerado. En Rangún parecen brotar nuevos edificios de la noche a la mañana y las carreteras se extienden hacia las regiones más recónditas. A medida que disminuye la opresión militar, los prospectores extranjeros toman nota de los abundantes recursos minerales, madereros y petroleros, que despiertan tentadoras previsiones comerciales para uno de los países más pobres del mundo.

Ante tal perspectiva, no puede garantizarse la continuidad de la extraordinaria vida silvestre de Birmania. Asegurar que parte de ella soporte la transición del país hacia la modernidad requiere convencer a los políticos y a la comunidad local de que merece la pena conservarla, especialmente desde el punto de vista económico. Los datos corroboran ese planteamiento: en un informe reciente comisionado por la Unión Europea se estima que los ecosistemas forestales terrestres y acuáticos de Birmania, incluidos ciertos hábitats vitales para algunos peces e insectos de importancia agrícola, reportan al país unos ingresos anuales de 7300 millones de dólares.

Sin embargo, el apoyo financiero a los parques nacionales actuales solo representa un 0,2 por ciento del presupuesto de Birmania. Según la economista ambiental Lucy Emerton, del Grupo de Gestión Ambiental, una consultora con sede en Sri Lanka especializada en sostenibilidad, la suma se reduce a 26.600 dólares destinados a vigilancia, investigación, divulgación y otros gastos operativos a repartir entre todas las áreas protegidas. Pero la experta añade que aun en el caso de que Birmania estuviera dispuesta a invertir más en proteger su biodiversidad, la simple realidad es que el Gobierno no dispone de la financiación para hacerlo.

Los conservacionistas creen haber dado con una solución parcial que llevaría a Birmania a salvaguardar su vida silvestre y, al mismo tiempo, le proporcionaría el dinero para hacerlo: el ecoturismo. Llevada adecuadamente, esta variedad de turismo enfocada hacia la naturaleza actúa de forma sostenible y responsable desde el punto de vista ambiental, e instruye tanto a los locales como a los visitantes sobre la importancia de preservar la fauna y la flora. Aunque Birmania ya recibe tres millones de turistas al año, todavía tiene que sacar partido de todas las posibilidades que le ofrecen sus numerosas áreas naturales.

En teoría, la promesa de visitas extranjeras podría ayudar a convencer a la población y al Gobierno de proteger entornos de gran valor poniendo un precio sustancioso para acceder a las áreas naturales que más atraen a los viajeros. Sin embargo, el

EN SÍNTESIS

Tras un largo período de aislamiento político y económico del resto del planeta, Birmania mantiene inalteradas numerosas áreas naturales.

A medida que se reduce el control militar, la incipiente transición del país hacia la modernidad suscita dudas acerca del futuro de sus parajes naturales.

Los conservacionistas esperan persuadir a la población local y al Gobierno para conservar la biodiversidad utilizándola como reclamo para el ecoturismo.

Sin embargo, aun en las mejores condiciones resulta difícil desarrollar con éxito un proyecto ecoturístico. Y Birmania presenta numerosos factores en contra.

PETER STUCKINGS, GETTY IMAGES (*páginas precedentes*); MAPPING SPECIALISTS (*mapa*)



UN PESCADOR rema por el lago Indawgyi, en el norte de Birmania. Se están elaborando planes para promover el lugar como destino ecoturístico.



desarrollo de un ecoturismo eficaz entraña una gran dificultad hasta en las mejores condiciones, más aún en un lugar políticamente inestable, sumido en una profunda pobreza y con limitaciones logísticas como Birmania. ¿Querrán viajar los turistas? ¿Preferirán las comunidades locales el turismo a la madera? ¿Renunciará el Gobierno a la explotación del gas y el petróleo en favor de la conservación de los manglares? Nadie conoce las respuestas, pero una cosa sí está clara: si no se toman medidas rápidas para conservar la naturaleza de Birmania, el paraíso no tardará en deteriorarse.

UNA OPORTUNIDAD ÚNICA

Frank Momberg, conservacionista de Fauna y Flora Internacional, una ONG con sede en Cambridge, lidera el desarrollo del ecoturismo en Birmania. En 2006 se aventuró por primera vez en el país, en aquel entonces una «especie de hueco en el mapa» en términos de exploración biológica. Casi todos los conservacionistas habían desistido de trabajar allí debido a los conflictos armados que se desataban en el país y a las sanciones internacionales. Cuando llegó, Momberg se encontró con un lugar que parecía «una imagen congelada del pasado», con carros tirados por bueyes y pequeñas comunidades dedicadas a la agricultura ecológica. Pero lo más importante es que halló vida silvestre en abundancia.

Esa excepcional conservación es producto del largo historial de violaciones de derechos humanos y represión sufrido por el país. Tras independizarse del Reino Unido en 1948, Birmania pasó penurias mientras distintas facciones se batían por obtener el poder. Al hacerse con el control en 1962, el Consejo Revolucionario de la Unión de Birmania dejó el país sumido en la más terrible pobreza y aislado de buena parte del mundo exterior.

A pesar de esa desoladora realidad política y social, Momberg, que en aquel entonces residía en Indonesia, se dio cuenta de que, tras su visita inicial, los recuerdos de Birmania acudían a su mente una y otra vez. Comenzó a pasar allí todas sus vacaciones y descubrió nuevas especies en cada uno de sus viajes, desde anfibios hasta insectos, plantas y peces, ninguno de ellos registrado todavía en Birmania. Pero el descubrimiento culminante se produjo en una expedición al extremo noroeste del país en la que Momberg y otros ecologistas hallaron un nuevo primate: el mono de hocico chato de Birmania (*Rhinopitecus strykeri*). Momberg propuso que Fauna y Flora Internacional abriera una sucursal en Rangún. No obstante, sus superiores se resistían. «Todos querían oír historias de Birmania», recuerda, «pero no estaban muy dispuestos a comprometerse».

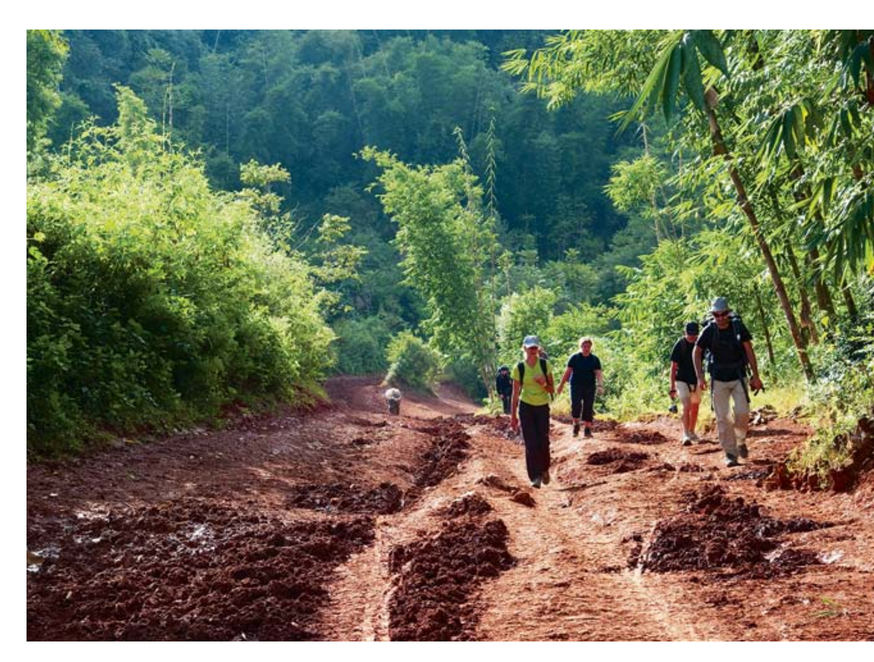
En 2010, la situación política dio un giro. El Gobierno se inclinó hacia un modelo cuasi democrático que se tradujo en la liberación de un gran número de prisioneros políticos y una menor opresión en el ámbito económico y mediático. Aunque siguen existiendo áreas controladas por los rebeldes, se han producido armisticios de crucial importancia. Como resultado, Momberg obtuvo al fin su sucursal en Rangún. Varias organizaciones conservacionistas internacionales siguieron su camino. Y, al mismo tiempo, comenzaron a llegar más turistas extranjeros.

A la vista de la progresiva estabilización política de Birmania y crecimiento del turismo, Momberg considera que el país se halla hoy en el momento idóneo para desarrollar el ecoturismo antes de que se afiancen otros intereses opuestos. «Birmania vive un momento histórico y emocionante», afirma. «En este período de transición resulta fundamental actuar con rapidez, ya que en el futuro habrá demasiados intereses personales.» De hecho, tal y como señala el ecólogo William McShea, del Instituto Smithsoniano de Biología de la Conservación, ahora mismo los únicos que pagan por los recursos naturales son los que se los están llevando. La esperanza reside en que, al entrar en juego desde el primer momento, los conservacionistas podrán hacer planes cuidadosamente desde un principio, tanto para preservar al máximo la naturaleza como para financiar las mejores prácticas de ecoturismo.

En 2012, Momberg y sus colaboradores dieron el salto y buscaron un lugar donde poner en práctica su primera tentativa en el mundo del ecoturismo administrado por comunidades locales. Además de mantener los tres preceptos fundamentales del turismo ecológico (naturaleza, sostenibilidad y divulgación), la variedad comunitaria incide sobre todo en dar autonomía y beneficiar a la población local, que por lo general gestiona el turismo ella misma y crea una cooperativa para distribuir los beneficios. En los manglares de la isla Meinmahla, convenientemente situados al suroeste de Rangún, el Gobierno consideraba que la densidad de cocodrilos era demasiado elevada; por otro lado, cualquier posibilidad de fomentar el turismo en torno al mono de hocico chato recién descubierto quedó aparcada de manera indefinida después de que los insurgentes se hicieran con el control de las carreteras que accedían al bosque. En cambio, Indawgyi parecía el lugar ideal. El lago alberga casi 450 especies de aves y ya está clasificado como un santuario para la vida silvestre, lo

que supone que el hábitat y las especies locales gozan de cierta protección formal. Dicha protección se extiende a los bosques circundantes, hogar de elefantes, del amenazado ciervo porcino y de los vulnerables gibones hulock orientales. Pero lo más importante de todo era que los residentes locales parecían receptivos a la idea de abrir sus comunidades a los extranjeros, tal y como habían hecho los empleados del parque. «Si los habitantes logran beneficiarse del turismo, entonces protegerán lo que los turistas vienen a ver: la naturaleza y el lago», afirma Htay Win, guarda forestal del Santuario Natural del Lago Indawgyi.

En 2014, una consultora independiente especializada en ecoturismo contratada por Momberg ayudó a 35 voluntarios locales a fundar Amantes de Indawgyi, el primer colectivo birmano de ecoturismo comunitario. Fauna y Flora Internacional donó kayaks y bicicletas de montaña que el colectivo alquila a visitantes por unos pocos dólares al día. «Lo bueno de los kayaks es que no hacen ruido, como las lanchas motoras», repara Su Hla Phya, miembro de Amantes de Indawgyi. Dos albergues de pequeño tamaño y unos pocos restaurantes completan la oferta turística. Las infraestructuras contrastan drásticamente con las del lago Inle, uno de los destinos más visitados de Birmania, donde el tráfico de lanchas motoras, la elevada ocupación hotelera, la deforestación y la contaminación han causado la caída en picado de la población de aves y peces.



EXCURSIONISTAS caminando entre Kalaw y el lago Inle, en el centro de Birmania.

JOEL CARILLET, GETTY IMAGES

En un futuro cercano, los conservacionistas y el Gobierno esperan desarrollar en toda Birmania programas similares al de Indawgyi siguiendo el ejemplo de las florecientes empresas de ecoturismo en lugares como Costa Rica, Namibia y Ruanda. En tiempo reciente, el Gobierno ha elaborado un plan nacional de regulación y desarrollo de turismo sostenible, así como una serie de estrategias ecoturísticas para 21 de las 45 áreas protegidas de Birmania. Aunque en la actualidad se halla protegido el 6 por ciento del país, las autoridades esperan que la cifra alcance el 10 por ciento hacia 2030. «Birmania es prometedora porque entiende que sus recursos culturales y naturales pueden convertirse en activos que ayuden a mejorar la economía», afirma Hannah Masserli, especialista en desarrollo turístico privado del Banco Mundial. «Desean compartir su cultura y su naturaleza, pero al mismo tiempo quieren cuidar de ellas y protegerlas a largo plazo».

Con todo, a juzgar por la historia del ecoturismo, las probabilidades de éxito no son muy altas. Por cada triunfo hay también múltiples derrotas. La publicidad ecológica engañosa (*greenwashing*) invade la industria en forma de numerosas propuestas que aseguran proteger el ambiente cuando en realidad causan más daños que beneficios. James Sano, del Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF), recuerda un centro turístico en Malasia que al abrir sus puertas se hacía llamar destino ecoturístico con la excusa de la delgada franja de selva que separaba el hotel del campo de golf; también se destapó que varios ecohoteles de Cayo Ámbar Gris, en Belice, vertían al entorno aguas residuales sin tratar. «En todo el mundo los productos ecoturísticos genuinos son sin duda una minoría», asegura Ross Dowlling, experto en turismo de la Universidad Edith Cowan en Joondalup, Australia. «Muchos operadores turísticos pegan simplemente la etiqueta *eco* delante del nombre porque resulta atractiva y comercializable.»

Dejando a un lado las codiciosas campañas de marketing, aun cuando las intenciones de los operadores son puras, a menudo los resultados no están a la altura de las ambiciones debido a otras razones. Por ejemplo, en 1990, el WWF puso en marcha un programa de ecoturismo en Dzanga Sangha, una impresionante región selvática de la República Centroafricana donde habitan elefantes y gorilas, entre otros animales. Pero llegar a la cabaña exigía o bien conducir durante 16 horas, o bien pagar un costoso vuelo chárter. «No basta con ofrecer un sitio lo bastante interesante como para que la gente lo visite, aun habiéndolo dotado de la infraestructura adecuada», apunta Alex Moad, director adjunto de cooperación técnica de los Programas Internacionales del Servicio Forestal de EE.UU. «En el éxito del ecoturismo también influyen factores que no dependen directamente del propio lugar, como un buen transporte.»

El transporte en Dzanga Sangha ha mejorado con los años. Entre 2007 y 2011 el parque recibió de forma regular hasta 600 turistas cada año, una cifra que prometía hacerlo autosostenible hacia 2016. Pero al estallar la guerra civil en 2013 los trabajadores se vieron forzados a suspender todas las actividades turísticas. Ahora que la paz ha retornado, el WWF alberga la esperanza de que Dzanga Sangha restaure el número de visitantes. No obstante, la recuperación llevará tiempo. Cuando el parque reabrió sus puertas en 2014 tan solo recibió la visita de 37 turistas.

UN LARGO CAMINO POR RECORRER

Todavía es demasiado pronto para saber qué sucederá en Indawgyi, pero de momento las ideas de Momberg se han convertido parcialmente en realidad. En primer lugar, los turistas muestran interés en visitar el lago. Antes de que Fauna y Flora Internacional se involucrara en 2013, Indawgyi solo recibía la visita de unos 20 turistas al año. Ahora que se publicita en Internet y en las guías Lonely Planet, las cifras han rebasado los 300 visitantes. Los turistas gastan una media de 45 dólares durante su estancia en el lago, lo que solo en 2014 supuso una inyección de unos 19.000 dólares en la economía local. Representó un aporte notable para la comunidad de 300 hogares que conforman la aldea de Lonton, el epicentro ecoturístico del lago, donde las familias ganan unos 1080 dólares al año.

Los beneficios procedentes de los alquileres han servido para financiar tratamientos hospitalarios y matrículas escolares a los miembros más pobres de la aldea. Pero el mayor logro radica en que, a lo largo de todo el proceso de desarrollo y promoción de Indawgyi como destino ecoturístico, la población local ha apoyado la iniciativa aun si la mayoría no gana dinero directamente de los turistas.

No obstante, queda mucho por mejorar. Para empezar, la oferta ecoturística de Indawgyi está lejos de ser impecable. Las opciones para deshacerse de los residuos inorgánicos se reducen a quemarlos o enterrarlos en el lugar, en vez de reciclarlos o enviarlos a un vertedero. Por otro lado, los sistemas de tratamiento de aguas residuales son inexistentes. Por tanto, los ecoturistas no solo contribuyen a conservar el ambiente; también lo degradan sin saberlo, al menos en lo que a producción de residuos se refiere. Además, el acceso a las colinas boscosas que rodean el lago —un paraíso para los excursionistas— queda cerrado de forma puntual debido a la presencia del insurgente Ejército para la Independencia de Kachin, un grupo militar establecido en el norte. Y los miembros de Amantes de Indawgyi no tienen experiencia guiando en la naturaleza. «Si lo que le interesa a uno es avistar aves, ¿quién le va a ayudar a identificarlas?», explica McShea a modo de ejemplo. «Muchos países han formado a un grupo base de ornitólogos, pero Birmania no lo ha hecho todavía.»

La infraestructura supone un problema adicional. El aeropuerto más próximo al lago se halla a seis horas de viaje a través de una carretera mortificante que solo puede recorrerse con un vehículo privado y caro. La mayoría de los turistas se decanta por la opción más barata, es decir, hacer un viaje de 24 horas desde Mandalay en tren y en el remolque de un tráiler. Llegados a Indawgyi, ya no existen ni servicios de Internet ni cobertura telefónica. Por otro lado, los dos pequeños albergues (los únicos sitios donde los turistas pueden alojarse de forma legal) solo disponen de electricidad dos horas al día. Para algunos viajeros la austeridad de las condiciones supone un incentivo, un descanso bien recibido del ajetreo de un mundo dependiente de los enchufes. Pero para muchos otros esas mismas condiciones suponen el factor decisivo para descartar la opción. «Actualmente Birmania es un destino para ecoturistas audaces a los que no les importa hacer sacrificios y les recompensa la historia natural del país», comenta Chris Wemmer, miembro honorario de la Academia de las Ciencias de California y científico emérito del Parque Zoológico Nacional del Instituto Smithsoniano. «Pero las señoras mayores en zapatillas aficionadas al avistamiento de aves no estarán dispuestas a soportar esas condiciones.»

Kyi Kyi Aye, experimentada asesora turística de la Federación Turística de Birmania y corresponsable de la estrategia ecoturística, insiste en que las trabas que dificultan, entre otras cosas, el desarrollo de Indawgyi se terminarán sorteando. Señala que las cosas llevan su tiempo. «Queremos hacer de Birmania un lugar mejor donde vivir y un buen destino turístico. Pero el país se acaba de abrir. Es un proceso gradual», apunta.

La pregunta es si Birmania podrá superar esos escollos a tiempo para proteger su fauna y su flora. En el caso de Ruanda, cuyo ecoturismo enfocado al gorila de montaña se considera uno de los ejemplos actuales con mayor éxito de este tipo de programas, el proceso llevó dos décadas. El Programa Internacional de Conservación del Gorila, creado por una coalición de organizaciones no gubernamentales, comenzó a desarrollar el ecoturismo en 1979. Pero el genocidio de 1994 y la agitación política desbarataron los esfuerzos hasta 1999, año en que el país volvió a estabilizarse. La elaboración y la puesta en práctica del programa supusieron una inversión inicial de unos 2 millones de dólares en formación, infraestructura y marketing. Pero esa cantidad ya se ha amortizado varias veces: solo en 2014 los gorilas generaron cerca de 16 millones de dólares a través de la tasas de entrada al parque. Los beneficios se reparten en el país y se destinan a proyectos de desarrollo. Además, el Gobierno ha declarado nuevos parques nacionales con el fin de ofrecer a los turistas un motivo por el que prolongar su estancia en Ruanda. «No solo protegemos por el bien de los gorilas, también por los beneficios económicos», matiza Michel Masozera, director del programa de la Sociedad para la Conservación de la Vida Silvestre en Ruanda. «Los políticos y las comunidades locales son conscientes de esa idea.»

De acuerdo con Adam Simpson, director del Centro por la Paz y la Seguridad de la Universidad del Sur de Australia, en el caso de Birmania, las dificultades que de por sí entrañan la creación y la puesta en marcha de una iniciativa ecoturística se complican aún más debido a profundos problemas sociales, como la corrupción o las actuales restricciones de libertad democrática. Según él, la burocracia birmana se rige por una ancestral cultura de decisiones autoritarias tomadas por los líderes militares y, además, al sistema político se suma su amigo el capitalismo. «Los principales obstáculos que limitarán el funcionamiento de la industria ecoturística son los mismos que reducen la eficacia del Gobierno a escala nacional», asegura. «Hasta que no se aborden todas esas dificultades cuesta creer que el ecoturismo, a pesar de su buena acogida, vaya a tener repercusiones notables en la protección del ambiente.»

Sin embargo, a la luz rosada del atardecer es fácil ser optimista en Indawgyi. Mientras los turistas leen y toman té en el porche, Ngwe Lsin, director del programa de conservación forestal del norte de Birmania elaborado por Fauna y Flora Internacional, se sienta tras una larga jornada de reuniones con las comunidades locales. «De momento no podemos afirmar que el turismo esté beneficiando la conservación de esta zona, ya que los visitantes solo aportan escasos ingresos adicionales», admite. «Pero me imagino que en diez años la región se habrá apaciguado y estará más abierta y accesible. Quizás entonces cada pueblo cuente con su pequeño albergue y los turistas puedan recorrer todo el lago.» Tal vez la seguridad que pueda traer consigo una próspera actividad ecoturística deba llegar a expensas de sacrificar una parte de la mágica naturaleza birmana. Pero sería una concesión que los ecologistas estarían dispuestos a admitir. Como dice Lwin: «Lo bueno y lo malo vienen siempre de la mano». IyC

PARA SABER MÁS

A new species of snub-nosed monkey, genus *Rhinopithecus* Milne-Edwards, 1872 (primates, colobinae), from northern Kachin state, northeastern Birmania. Thomas Geissman et al. en *American Journal of Primatology*, vol. 73, n.º 1, págs. 96-107, enero de 2011.

The economic value of forest ecosystem services in Birmania and options for sustainable financing. Lucy Emerton y Yan Min Aung. International Management Group, septiembre de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Presión turística sobre la vida silvestre de las Galápagos. Paul Tullis en *IyC*, agosto de 2016.

por David Suárez Montes, Liliana Griego y José Manuel Rico Ordás

Microalgas de vertederos urbanos

En estos ambientes hostiles proliferan numerosas algas microscópicas, algunas con posibles aplicaciones biotecnológicas

El fitoplancton es el grupo de organismos eucariotas más numeroso y diverso de la Tierra. Su rendimiento fotosintético (la eficiencia en captar dióxido de carbono y expulsar oxígeno) es el más importante de los seres vivos, incluso mayor que el de las plantas superiores. Constituyen, además, la base de las cadenas tróficas de todos los ecosistemas.

Dentro de este inmenso grupo figuran las microalgas. Estos organismos unicelulares son ubicuos gracias a que poseen un metabolismo muy adaptable que les permite vivir en todo tipo de ambientes y condiciones adversas. Pero, debido a su gran simplicidad fenotípica, su identificación es una tarea ardua. Además, durante el ciclo biológico muchas microalgas adoptan formas reproductoras diversas (morfotipos), lo que hace que se confundan con otras especies y complica su clasificación.

La prospección de lugares singulares e inexplorados puede ofrecer una oportunidad única para descubrir nuevas especies de microalgas que desarrollan características metabólicas inusuales de interés biotecnológico. Un lugar peculiar lo constituyen los vertederos que gestionan los residuos sólidos urbanos. Se trata de ambientes tremendamente hostiles para cualquier ser vivo porque en ellos se desarrollan unas condiciones fisicoquímicas especiales (*p*H extremos, presencia de metales pesados y otras sustancias tóxicas derivadas de procesos de degradación, etcétera).

Nuestro grupo se propuso estudiar la biodiversidad de microalgas en un vertedero adscrito al concejo asturiano de Serín, así como el efecto que ejercen en ella las especiales condiciones del entorno. Para ello aislamos en cultivos las microalgas procedentes de diferentes charcas que se forman en la superficie del vertedero. Además, analizamos los parámetros fisicoquímicos de esas charcas. Establecimos así una relación entre los órdenes taxonómicos más abundantes con las características fisicoquímicas de cada masa acuática.

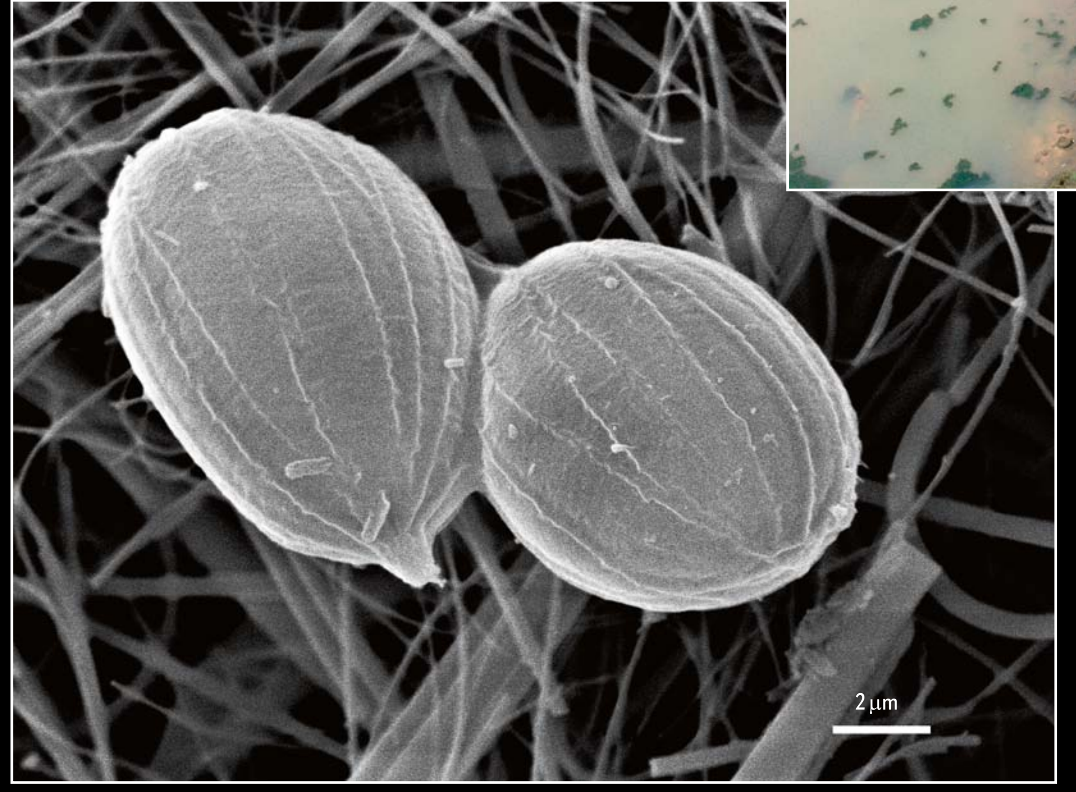
Las cepas que hemos identificado incluyen especies con potencial para su aprovechamiento comercial, en campos tan diversos como la biomedicina o la captura de CO_2. Hemos descubierto también que la biodiversidad de estos ambientes tan hostiles es muy elevada, y que algunas microalgas corresponden a especies previamente desconocidas.

—David Suárez Montes,
Liliana Griego
y José Manuel Rico Ordás
Departamento de Biología de Organismos y Sistemas
Universidad de Oviedo



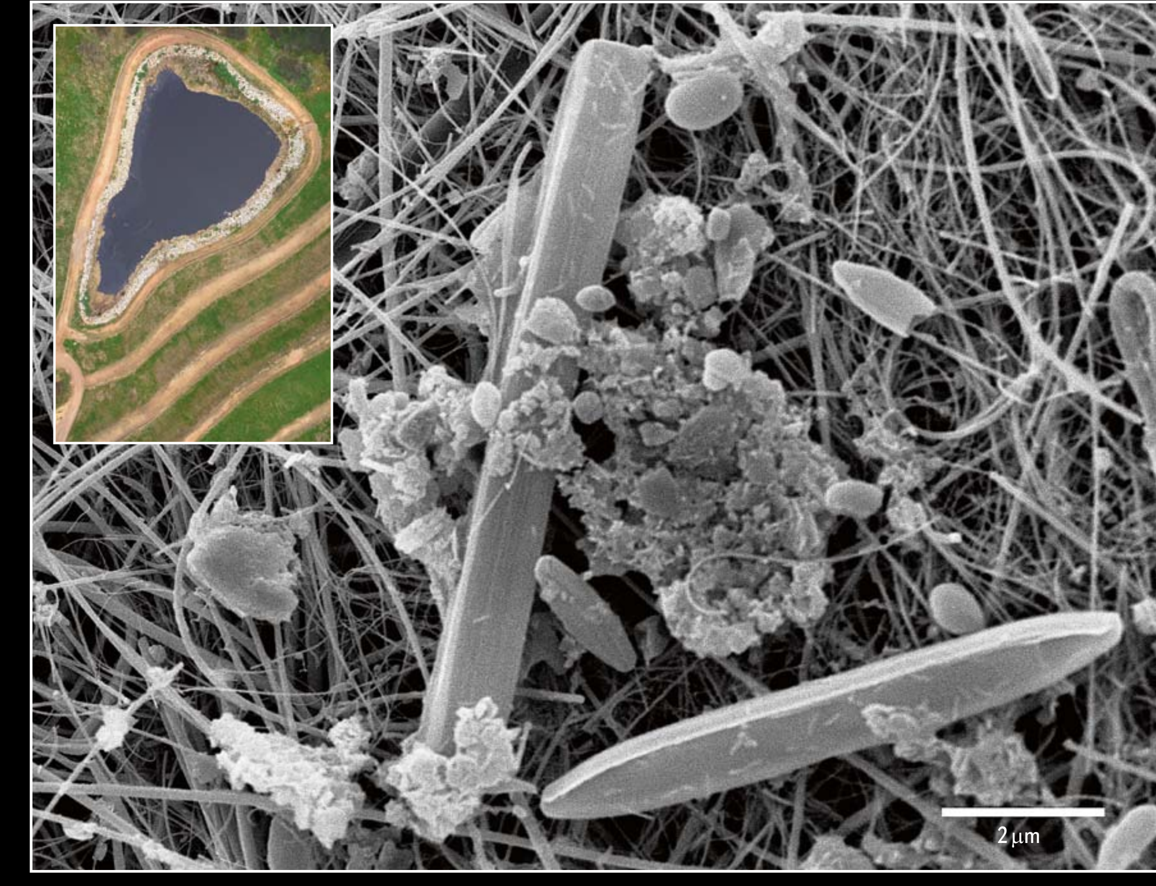
EL VERTEDERO DEL CONCEJO DE SERÍN, en Asturias, se encarga de la recogida, el tratamiento y, en ocasiones, el aprovechamiento sostenible de todos los residuos sólidos urbanos de la provincia, además del procesamiento de otros residuos peligrosos en zonas restringidas.

LAS CHARCAS que se forman espontáneamente en concavidades del terreno del vertedero presentan un *p*H muy alcalino (superior a 10), temperaturas por encima de los 30 °C y, en general, muy pocos nutrientes.



COELASTRELLA es una de las algas identificadas en las charcas. La microscopía electrónica de barrido revela las estrías que atraviesan longitudinalmente la superficie celular, uno de los caracteres específicos del grupo. El análisis molecular basado en el gen *18S ADNr* ha resuelto que se trata de una especie no descrita con anterioridad.

EN EL VERTEDERO también existen charcas artificiales, como esta balsa donde se recogen los lixiviados de los residuos (*inserto*). El análisis del agua descubrió una alta concentración de ácidos orgánicos. A pesar de ello, la diversidad de microalgas hallada fue reseñable, como demuestra la fotografía de microscopía electrónica de barrido, donde se distinguen distintas diatomeas (clase Bacilariofíceas, *formas alargadas*) y clorofíceas (*formas redondeadas e irregulares*).



DAVID SUÁREZ (coelastrella); JOSÉ MANUEL RICO (*charca*); DOCUMENTAZUL PRODUCCIONES PARA PROYECTO RECO2VERY Y LILIANA GRIEGO (*charca artificial y diatomeas*)

por Marta Bertolaso y Sandra D. Mitchell

Marta Bertolaso es profesora e investigadora en la Universidad Campus Biomédico de Roma.

Sandra D. Mitchell es directora del departamento de historia y filosofía de la ciencia de la Universidad de Pittsburgh.



Pluralismo integrador

Un nuevo enfoque para comprender la complejidad biológica

Los organismos biológicos son sistemas compuestos de órganos y tejidos que, a su vez, están formados por células que contienen proteínas codificadas por genes. Estos sistemas, cuya complejidad podemos entrever por lo dicho, evolucionan, se desarrollan y manifiestan comportamientos sensibles a los cambios que se producen en sus entornos interno y externo. Constan de muchas partes que se organizan para que el sistema funcione a un nivel superior, manifiestan dinámicas no lineales y su misma existencia está supeditada a una trayectoria evolutiva que depende del azar y la adaptación. ¿Cómo puede la ciencia llegar a entender unos sistemas tan complejos?

Las estrategias basadas en descomponer los sistemas en sus partes más pequeñas, como átomos o partículas fundamentales, han demostrado su utilidad para el esclarecimiento de un gran número de tipos de sistemas físicos complejos, pero solo facilitan, en el mejor de los casos, un entendimiento parcial de la complejidad biológica.

¿Por qué es así? Consideremos un caso concreto de comportamiento emergente. Las colonias de abejas forman una clase de superorganismos. Cada una se compone de hasta 80.000 individuos. No todos ellos realizan todos los trabajos propios de su ciclo biológico (apareamiento, reproducción y aprovisionamiento de alimento). Solo la reina se reproduce, mientras que las obreras asumen otras tareas que cambian a lo largo de su vida: en un momento dado, algunas limpiarán la colmena, otras alimentarán a las larvas, recibirán comida de las recolectoras, construirán panales de miel, custodiarán la colmena, retirarán los cadáveres o recolectarán néctar, polen y agua. La tarea que una obrera desempeña varía en función de sus genes, edad y experiencia.

Pero todo ello no constituye únicamente un sistema de abajo arriba (*bottom-up*). La mera agregación de lo que hace cada uno de los individuos no representa todo lo que ocurre en la colonia. Las necesidades de esta, considerada como un todo, también condicionan la división del trabajo. Si los panales que almacenan la miel están casi llenos, serán menos los individuos que saldrán a recolectar néctar. Si están vacíos, serán más. Si un determinado grupo de edad es abatido de repente, las abejas más jóvenes empezarán a desarrollarse más rápidamente para llenar el vacío. El sistema responde para satisfacer el mantenimiento de la colonia. Lo consigue a través de bucles de retroalimentación dinámicos e interactivos. Es cierto que lo que la colonia hace es el resultado de las actividades de todos los individuos. Pero lo que los individuos hacen también es el resultado del estado de la colonia en su conjunto. He aquí uno de los casos de complejidad emergente a los que se enfrenta la ciencia.

Existen muchos otros ejemplos de estructuras, comportamientos y dinámicas emergentes en el mundo de la biología: desde la muy estudiada *E. coli* al cáncer. La complejidad de la regulación de los diferentes niveles de estos sistemas requiere algo más que un enfoque reduccionista de abajo arriba que identifique cada componente básico y lo estudie por separado. Las partes aisladas no siempre se comportan de la misma forma cuando interactúan en un contexto. Necesitamos un enfoque que trascienda la estrategia reduccionista de descomposición.

Veamos ahora qué nos enseña el cáncer. Esta enfermedad no es una «cosa» unitaria dentro del organismo, o un trastorno caracterizado solo por una o varias células anómalas. Su desarrollo se debe más bien a una desregulación compleja, que afecta a varios niveles de organización, con interacciones entre ellos que van desde las células a los tejidos y viceversa. Para estudiarlo es necesario tener en cuenta los genes, el genoma, el epigenoma, el proteinoma, el metaboloma, las células implicadas, así como las interacciones celulares, los tejidos y órganos, e incluso el propio organismo como un todo y su entorno. No es, pues, extraño que la comprensión de esta enfermedad se resista a tantos intentos de reducirla a un fenómeno solo molecular [*véase* «El largo camino hacia la compresión del cáncer», por George Johnson; Investigación y Ciencia, enero de 2014].

La complejidad demanda algo más que un enfoque que considere cada componente básico, lo estudie por separado e intente luego deducir el comportamiento del sistema. Surgen propiedades estables en diferentes niveles y escalas, y hay características importantes del sistema que resultan de las interacciones regulatorias entre múltiples niveles. Los modelos limitados a un único nivel no solo resultan incompletos, sino que también pueden mermar nuestra capacidad para aplicar la ciencia y para alcanzar metas prácticas, como el desarrollo de nuevos tratamientos.

Pensemos en la frenética heterogeneidad del cáncer, un problema irresoluble para un enfoque reduccionista. Dicha heterogeneidad se da entre diferentes tipos de tumores, e incluso dentro de un mismo tumor [*véase* «Heterogeneidad intratumoral», por Ignacio Varela; Investigación y Ciencia, octubre de 2014]. Puede ser genética, genómica, jerárquica, dinámica, bioquímica, metabólica, morfológica o histológica. Se da también en las diferentes fases de la enfermedad (carcinogénesis, progresión y metástasis). Además, los diferentes niveles de

organización biológica también pueden desempeñar papeles diferentes en distintos individuos. La heterogeneidad en los niveles, fases e individuos provoca, pues, una variación de la respuesta a los tratamientos.

Quizás haya todavía quien conserve la esperanza de que la ciencia descubra, tarde o temprano, la piedra filosofal que reduzca los numerosos métodos, modelos y representaciones a una sola teoría unificada y completa. Sin embargo, en nuestra opinión, es una esperanza vana. La pluralidad de métodos, modelos y representaciones (incluidas estrategias ascendentes, descendentes y horizontales) describe mejor la práctica científica.

Además, hay razones filosóficas para pensar que es equivocado considerar un modelo completo y unificado para cada fenómeno complejo. Todos los modelos científicos son abstractos y, por consiguiente, parciales: dejan a un lado algunos factores para seguir la pista a otros. Lo que un modelo selecciona representa una perspectiva (celular o genética, por ejemplo). Y, aunque un modelo pudiera ser completo, representativo de todos los factores de un sistema complejo, en todas las escalas y grados de precisión, no aportaría un entendimiento del sistema, pues sería, simplemente, un duplicado del sistema en cuestión. Lo que se pierde desde una perspectiva (a través de un modelo que represente la heterogeneidad de las células tumorales, pero no considere la heterogeneidad entre los diferentes individuos o entre las sucesivas fases de una progresión tumoral) puede ser representado por otros modelos. La parcialidad y el perspectivismo de las representaciones científicas exigen una pluralidad de modelos.

Pero el pluralismo no es el final de esta historia. De poco sirve desarrollar diversos modelos si luego estos permanecen aislados, de espaldas unos a los otros. Al pluralismo cabe añadirle, pues, una dimensión integradora. Solo si se emplean de forma conjunta, integrada, pueden estos modelos ampliar nuestro conocimiento y permitirnos actuar en el mundo. Pensemos en el desafío de encontrar mejores terapias contra el cáncer. Los análisis moleculares centrados en un solo factor, que buscaban fármacos universalmente eficaces para controlar el crecimiento tumoral en todos los individuos y en todas las fases de la enfermedad han fracasado. Teniendo en cuenta la complejidad del organismo humano y la heterogeneidad del cáncer, las terapias más efectivas son las desarrolladas a partir de múltiples modelos que representan diferentes trayectorias y contextos. La ciencia debe desplegar, pues, estrategias integradoras —no solo unificadoras— para comprender los sistemas complejos e intervenir en ellos.



Las enfermedades complejas implican varios niveles de causación. Esto sugiere que los tratamientos tendrán más éxito si actúan en varios niveles. El pluralismo de modelos refleja —más allá del carácter parcial y perspectivista de las representaciones— la coexistencia de niveles diferentes de causación y de niveles múltiples de intervención. Adoptar una estrategia que busque unificar la ciencia reduciéndola a unas pocas leyes fundamentales es poco conveniente para las ciencias biológicas, que estudian sistemas de múltiples componentes y niveles, sistemas complejos evolucionados. Se requiere la integración para poder explicar los acontecimientos y desarrollar medios efectivos de intervención.

Volvamos a la división del trabajo entre las abejas: los modelos centrados en la variación genética, o en la diferencia de edad o de experiencia, proporcionan, cada uno de ellos, una visión parcial del comportamiento complejo. En realidad, parece que la información sobre la cantidad de néctar que hay en una colmena se detecta por los tiempos de espera de las abejas recolectoras, cuyo comportamiento viene determinado por su genética y otras disposiciones para recolectar. Al integrar los distintos modelos, sin reducir unos a otros, dentro de un marco sistémico, obtenemos una visión de las interacciones dinámicas que se dan entre los procesos a nivel individual y los procesos a nivel colonial.

En los casos que hemos visto, y probablemente en otros muchos, el pluralismo integrador describe mejor que cualquier otra aproximación el carácter de los métodos, modelos y representaciones que los científicos desarrollan en su intento de comprender la complejidad de los fenómenos biológicos. IyC

PARA SABER MÁS

Biological complexity and integrative pluralism. Sandra D. Mitchell. Cambridge University Press, 2003.
Unsimple truths: Science, complexity and policy. Sandra D. Mitchell. University of Chicago Press, 2009.
Philosophy of cancer: A dynamic and relational view. Marta Bertolaso. Springer, 2016.

por Paul Davies



Paul Davies es el director de BEYOND, el Centro para los Conceptos Fundamentales de la Ciencia de la Universidad estatal de Arizona, y autor de *Un silencio inquietante: La nueva búsqueda de inteligencia extraterrestre* (Crítica, 2011).

Muchos planetas, no demasiada vida

Aún no tenemos ni idea de si es fácil o no que surja la vida. Podría ser dificilísimo

Cuando yo era todavía estudiante, en los años sesenta, casi todos los científicos creían que estábamos solos en el universo. Se ridiculizaba la busca de vida inteligente más allá de la Tierra; se equiparaba a la búsqueda de hadas. El escepticismo se centraba en el origen de la vida, de la que en general se presuponía que había sido una carambola química con una probabilidad tan increíblemente baja que no podría ocurrir dos veces. «El origen de la vida parece por ahora casi un milagro —esta era la forma que Francis Crick tenía de decirlo—: tantas son las condiciones que tuvieron que satisfacerse para que saliese adelante.» Jacques Monod coincidía. En su libro de 1976 *El azar y la necesidad* escribía: «El hombre sabe por fin que está solo en la indiferente inmensidad del universo, del que ha surgido por azar».

Hoy, el péndulo se ha inclinado con toda claridad hacia el lado opuesto. Muchos científicos prestigiosos proclaman que el universo bulle de vida, parte de ella, al menos, inteligente. El biólogo Christian de Duve fue tan lejos que llamó a la vida «imperativo categórico». Sin embargo, la ciencia apenas si ha cambiado. Estamos hoy casi tan a oscuras acerca del camino que va de la no vida a la vida como cuando Charles Darwin escribió: «Pensar en este momento presente en el origen de la vida carece de sentido; lo mismo podría uno ponerse a pensar en el origen de la materia».

No cabe duda de que SETI (por las siglas en inglés de «busca de inteligencia extraterrestre») ha recibido un enorme estímulo con el descubrimiento en los últimos tiempos de cientos de planetas extrasolares. Los astrónomos creen que podría haber miles de millones de planetas parecidos a la Tierra solo en nuestra galaxia. Está claro que no hay escasez de fincas habitables por ahí. Pero, como no sabemos cuál es el proceso que transformó un revoltijo de sustancias en una célula, con su mareante complejidad, resulta imposible calcular la probabilidad de que realmente se haya originado vida en esos planetas.

Carl Sagan señaló en una ocasión que el origen de la vida no puede ser tan difícil porque, de haberlo sido, no hubiese brotado tan deprisa una vez la Tierra se volvió hospitalaria. Es verdad que podemos remontar la presencia de la vida en la Tierra hasta hace unos 3500 millones de años. Pero no se puede conseguir significatividad estadística alguna con una muestra de uno.

Otro argumento común reza que, como el universo es tan grande, tiene que haber vida en alguna parte. Pero ¿qué quiere decir esta afirmación? Si restringimos nuestra atención al universo observable, debe de haber del orden de 10^{23} planetas. Sí, es un número enorme. Pero se queda en nada comparado con la probabilidad de que se forme por obra del azar siquiera una molécula orgánica simple. Si el camino de la química a la biología es largo y complicado, es bien posible que haya sido en menos de uno en un billón de billones de planetas donde haya germinado la vida.

Las hipótesis de que la vida se halla muy extendida se basan en una suposición tácita: que la biología no es el resultado final de reacciones químicas aleatorias, sino el producto de algún tipo de autoorganización direccional que favorece al estado vivo con respecto a otros, una suerte de principio vital que obrase en la naturaleza. Puede que lo haya, pero por ahora no se ha encontrado ni el menor indicio de su existencia.

Quizá no tengamos que mirar lejos. Si, como apuntaba Sagan, la vida brota con facilidad, debería haber empezado muchas veces en nuestro planeta natal. Si hubo múltiples orígenes de la vida en la Tierra, los descendientes microbianos de otra génesis podrían medrar a nuestro alrededor, formando una posible biosfera en la sombra. Nadie ha buscado en serio ante nuestras propias narices un tipo de vida que no conozcamos. Bastaría con descubrir un solo microbio «alienígena» para zanjar el asunto. IyC



TIM BOWER

por Pere Castells

Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es colaborador del proyecto elBullifoundation.



La nueva generación de robots de cocina

Diseñados con la estrecha colaboración de los cocineros y conectados con la Red 2.0

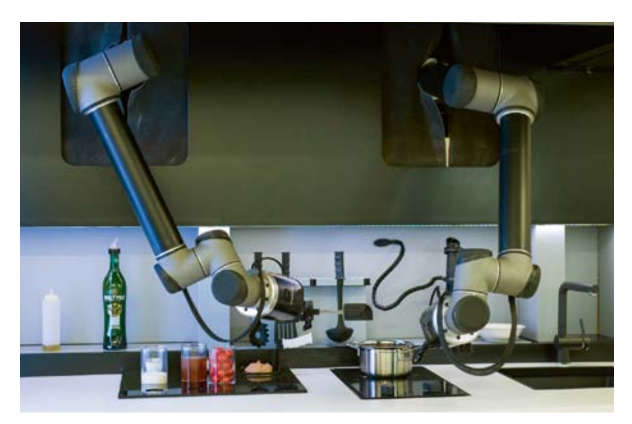
En el siglo xx, las técnicas derivadas de la revolución industrial llegaron a la cocina. La emancipación de la mujer en las sociedades occidentales provocó una demanda de electrodomésticos en todos los hogares. Así, la nevera eléctrica, la cafetera, el lavaplatos, el vaso triturador, la olla a presión, la tostadora, la licuadora, la montadora, la yogurtera, la inducción y, cómo no, el microondas, entre muchos otros ingenios, se introdujeron en las casas. Básicamente, lo que pretendían era automatizar procesos y, por tanto, ahorrar tiempo. La mayoría se publicitaban con el eslogan: «Con este aparato tendrás más tiempo libre».

En 1960 empezó a fraguarse la idea de un triturador-calentador para preparar comidas trituradas. La propuesta fue de una madre alemana que quería elaborar ella misma la comida de su bebé pero no encontraba ningún aparato doméstico que le permitiera triturar y calentar al mismo tiempo. Hasta 1971 no se comercializó la famosa Thermomix®, que tanto éxito ha cosechado en las cocinas profesionales y en las domésticas. Este aparato ya se vendió como «robot de cocina», concepto que produjo un gran impacto de mercado. Su gran aceptación hizo que aumentaran las propuestas de nuevos utensilios, en los cuales la automatización era el elemento clave.

En esa revolución culinaria los cocineros no tuvieron ningún protagonismo. A finales del siglo xx, en cambio, la creciente labor divulgativa de los chefs llevó consigo la participación de estos en el diseño y comercialización de nuevos aparatos, cuyo propósito era facilitar la preparación de las recetas que ellos mismos recomendaban.

En 1963, Pierre Verdun se inspiró en la labor de los hermanos Troisgros y Paul Bocuse, entre otros pioneros de la *nouvelle cuisine*, para diseñar una máquina que trituraba sólidos sin la necesidad de un medio líquido. Se bautizó con el nombre de Robot-coupe®. Según esos cocineros, era muy importante preservar el sabor de los productos; la posibilidad de triturarlos sin introducir ni siquiera agua conseguía ese objetivo.

«Robot» era ya un término con gancho comercial, por lo que se decidió que formara parte del nombre del aparato. Pero la principal novedad del mismo fue utilizar el prestigio de las vanguardias culinarias para darle credibilidad. La participación de los cocineros en el desarrollo del producto fue, pues, solo indirecta, pero constituyó un síntoma del cambio que se avecinaba.



CORTESÍA DE MOLEY ROBOTICS

A finales del siglo xx, pero sobre todo a comienzos del xxi, los cocineros empezaron a participar de forma mucho más directa en el diseño de aparatos para cocinar. Pensemos en el Roner®, la adaptación culinaria del baño termostático que se presentó en 1997 y cuyo nombre responde a los acrónimos de los chefs Joan Roca y Narcís Caner. Al ofrecer una gran precisión en la cocción, este aparato permitió el desarrollo de un nuevo tipo de cocina que se extendió por todo el mundo [*véase* «Cocina al vacío», por Pere Castells; Investigación y Ciencia, marzo de 2010]. El año pasado, Roca y Salvador Brugués dieron un paso más, adaptando el invento para uso doméstico. Nacía así el Rocook®, el primer robot para cocinar al vacío. Cuenta con el soporte de aplicaciones multimedia y conexión a redes sociales.

Pero cuando hablamos de «robot», probablemente imaginamos un robot-cocinero que prepara la comida según la receta que se le ha proporcionado. Esta es la idea que Marcos Oleynik, matemático e informático, decidió convertir en realidad en 2014. Para ello buscó la colaboración del cocinero Tim Anderson y fundó Moley Robótica. En este ambicioso proyecto participan también el ingeniero de la Universidad Stanford Mark R. Cutkosky, experto en manos robóticas, y Shadow Robot Company, empresa dedicada a la robótica humanoide con experiencia en trabajos para la NASA. Mediante dos brazos articulados, el robot opera según un registro de los movimientos culinarios generados previamente por Anderson. Está previsto que salga a la venta en 2017.

Otros proyectos novedosos en este campo se proponen aplicar la impresión 3D a la preparación de dietas personalizadas.

La obsesión por automatizar los procesos no debe olvidar que una parte de los usuarios quieren participar activamente en la elaboración del plato. Por tanto, los diseñadores de los nuevos robots harían bien en tener en cuenta que los aparatos deberán disponer de mecanismos de intervención no automatizada que permitan modificar las condiciones de trabajo.

Con todo, lo que realmente va a marcar el éxito o fracaso de los robots culinarios de última generación será la participación de los cocineros en el diseño y funcionamiento de los mismos, así como su conexión con las redes sociales para poder actualizar las recetas conforme se vayan generando nuevas propuestas.



EN SÍNTESIS

La diabetes mellitus de tipo 1 es una enfermedad autoinmunitaria en la que existe una destrucción progresiva y silenciosa de las células β, las productoras de insulina. Suele manifestarse a temprana edad, cuando la masa de células β cae por debajo de unos niveles que no permiten controlar la concentración de glucosa en sangre.

Las estrategias terapéuticas que se están investigando persiguen o bien detener el ataque inmunitario frente a las células β sin sacrificar la respuesta defensiva del paciente (inmunoterapia), o bien generar nuevas células β a partir de las aún existentes o de otras fuentes (terapias celulares).

Por tratarse de una enfermedad compleja, su curación tal vez se halle en la combinación de la inmunoterapia y la terapia celular. Además, es posible que no exista una única pauta terapéutica que resulte igual de útil para todos los pacientes.

MEDICINA

LOS CAMINOS HACIA LA CURACIÓN DE LA DIABETES

La inmunoterapia y la terapia celular podrían abrir una nueva etapa en el tratamiento de la diabetes de tipo 1, la variante autoinmunitaria de la enfermedad

Franz Martín, Eduard Montanya y Bernat Soria

LA DIABETES MELLITUS CONSTITUYE UNA DE LAS MAYORES EMERGENCIAS SANITARIAS DEL SIGLO XXI. Además de afectar a una parte notable de la población, su incidencia crece anualmente. Según los datos de la Federación Internacional de Diabetes, el número de personas con diabetes en el mundo en 2015 era de unos 415 millones (el 8,8 por ciento de la población). Debido a que se trata de una enfermedad compleja y de por vida, su tratamiento y complicaciones suponen el 12 por ciento del gasto sanitario global.

La enfermedad, que no es transmisible, aparece cuando el cuerpo no produce suficiente insulina o no la puede usar correctamente, lo que origina un aumento de los niveles de glucosa circulante en sangre (hiperglucemia). Existen varios tipos de diabetes mellitus (DM), de los cuales las más frecuentes son la de tipo 1 (DM1, en la que se produce una destrucción de las células del páncreas productoras de insulina), la de tipo 2 (DM2, en la que el páncreas no produce suficiente insulina o las células del organismo no responden a ella) y la gestacional (que aparece durante el embarazo). La DM1 es menos común que la DM2; se estima que afecta a entre el 7 y el 12 por ciento de los diabéticos y su incidencia global aumenta un 3 por ciento anualmente.

Franz Martín es catedrático de nutrición y bromatología de la Universidad Pablo de Olavide e investigador del Centro Andaluz de Biología Molecular y Medicina Regenerativa (CABIMER) y del Centro de Investigación Biomédica en Red de Diabetes y Enfermedades Metabólicas Asociadas (CIBERDEM). Investiga la forma de obtener células productoras de insulina a partir de células madre y el papel de la dieta en el desarrollo de la diabetes.

Eduard Montanya es jefe de la sección de diabetes del Hospital Universitario de Bellvitge y profesor de la facultad de medicina de la Universidad de Barcelona, así como director del grupo de investigación en diabetes y metabolismo y coordinador del Programa de Investigación de Diabetes en el Instituto de Investigaciones Biomédicas de Bellvitge (IDIBELL). En la actualidad es director científico de CIBERDEM.

Bernat Soria es catedrático extraordinario de medicina regenerativa y director del departamento de células madre del CABIMER e investigador del CIBERDEM. Su trabajo se centra en la obtención de células productoras de insulina a partir de células madre y el diseño de terapias celulares. Fue Ministro de Sanidad y Consumo en el período 2007-2009.

Desde el momento en que se diagnostica, el único tratamiento posible para la diabetes es en la actualidad la administración de insulina. Los enfermos la necesitan para el resto de la vida, y sin ella morirían. Este hecho básico no ha cambiado desde los años veinte del siglo pasado, hace ya casi cien años. Una vez diagnosticados, los pacientes tienen que iniciar un plan de autocuidado, guiado por los profesionales de la salud, que incluye la administración pautada de insulina, el control de la glucemia (de cuatro a seis veces al día), vigilancia de la dieta, actividad física regular y un programa de educación que permita al paciente conocer su enfermedad y actuar frente a las medidas anteriores.

En numerosos países, gran parte de estas actuaciones no son posibles y, además, para muchos niños y adolescentes la enfermedad supone una carga emocional difícil de manejar. Todo ello hace que en ocasiones la adherencia de por vida al plan terapéutico no sea la adecuada, lo que conduce a una progresión más rápida de las graves complicaciones de la enfermedad (retinopatía y ceguera, trastornos cardiovasculares, pie diabético, nefropatía y daño de los nervios periféricos o neuropatía) y a una disminución de la calidad y la esperanza de vida.

Por consiguiente, para los pacientes con DM1, la vida es una lucha constante para mantener lo más estable posible sus valores de glucemia, con el fin de retrasar al máximo la aparición y evolución de las complicaciones de la enfermedad.

Hoy día parece cada vez más evidente que la curación de la DM1 probablemente exigirá utilizar distintas estrategias al mismo tiempo. La inmunoterapia y la terapia celular podrían abrir una nueva etapa en el tratamiento de la enfermedad.

EVOLUCIÓN DEL TRATAMIENTO

Hasta el año 1923, el único tratamiento posible para la DM1 consistía en controlar la dieta evitando cualquier consumo de carbohidratos. No obstante, esta pauta no influía sobre el curso de la enfermedad y los pacientes morían en poco tiempo. En 1921, F. G. Banting y C. H. Best, de la Universidad de Toronto, consiguieron aislar la insulina a partir del páncreas de animales. Al año siguiente comenzaron los primeros ensayos clínicos en pacientes. La primera insulina comercial de uso terapéutico estuvo disponible en 1923, bajo el nombre de Iletin®. Sin embargo, la sustancia presentaba dos inconvenientes: era muy cara y causaba alergia en algunos pacientes, que se veían obligados a abandonar el tratamiento. Posteriormente, en 1982 apareció la primera insulina diseñada mediante ingeniería genética. Era sintetizada por bacterias de la especie *Escherichia coli* a las que se les había clonado el gen que codifica la insulina humana y resultaba más barata de producir que los métodos anteriores, por lo que solventaba los dos problemas mencionados.

Aunque en esencia el tratamiento de la DM1 no ha cambiado, ha habido un gran avance en la obtención de diferentes tipos de insulina, en sus sistemas de administración, en los equipos de monitorización de la glucemia, en las pautas dietéticas y en los programas de educación. Todo ello ha hecho más fácil la adherencia al tratamiento y la vida de los pacientes, que sufren complicaciones menos frecuentes y graves y, por consiguiente, han visto aumentar su esperanza de vida.

A pesar de todo, se plantea la cuestión fundamental de qué se puede entender como curación de la DM1. ¿Se podría considerar curación estar conectado a un equipo de pequeño tamaño que permita medir la glucemia y administrar insulina de un modo continuo y autónomo? Aquí las opiniones de los pacientes varían. Para algunos, la curación significaría suprimir la enfermedad y vivir su día a día como si nunca la hubieran padecido. Para otros, en cambio, bastaría con no tener que preocuparse del control de la glucemia, ya fuera gracias a la medicación o a la implantación de un dispositivo, de modo que pudieran mantener una calidad y esperanza de vida igual a la de la población general. Lo más probable es que la curación de la DM1 acabe contemplando la aplicación simultánea de distintas terapias. La razón de ello radica en la enorme complejidad de la enfermedad, que está provocada por un ataque del propio sistema inmunitario, el cual no reconoce a las células productoras de insulina como propias y las acaba destruyendo.

INMUNIDAD ALTERADA

La DM1 es una enfermedad autoinmunitaria cuyas causas son complejas y no del todo conocidas. Se sabe que es poligénica (se hallan afectados varios genes) y que puede estar desencadenada por distintos factores externos (virus, fármacos, estrés, daños ambientales). Debido a una o a varias de esas causas, el sistema

El cuerpo contra las células β

En la diabetes de tipo 1 tiene lugar un ataque patológico del sistema inmunitario contra las células β, las que segregan insulina en los islotes pancreáticos. La enfermedad la desencadenan ciertos elementos dañinos (virus, bacterias o factores ambientales), que provocan la liberación de proteínas de la membrana de las células β, los autoantígenos. Como consecuencia, se pone en marcha una cadena de reacciones en las que participan células y citocinas (proteínas celulares como interleucinas e interferones), que terminan por destruir las células β.

Bacterias
Virus
Factores ambientales
Páncreas
Célula β
Autoantígenos exógenos
Célula presentadora de antígenos
IL-12
IL-2
Linfocito T coadyuvante CD4+
Linfocito citotóxico CD8+
Citolisinas
IL-1
Célula β destruida
IFγ
Macrófago
Radicales libres

1 Por efecto de virus, bacterias o factores ambientales, las células β liberan ciertas proteínas de membrana, los autoantígenos.

2 Las células presentadoras de antígenos procesan los autoantígenos y los presentan en su superficie a los linfocitos T coadyuvantes CD4+. También segregan interleucina 12 (IL-12), que activa a estos linfocitos.

3 Los linfocitos T coadyuvantes CD4+ segregan interleucina 2 (IL-2), que activa a los linfocitos T CD8+.

4 Los linfocitos T citotóxicos CD8+ reconocen los antígenos de las células β y producen citolisinas para destruirlas.

5 Los linfocitos T coadyuvantes CD4+ liberan interferón gamma (IFγ), que activa a los macrófagos.

6 Los macrófagos segregan radicales libres e interleucina 1 (IL-1), que dañan a las células β.

inmunitario destruye las células β de los islotes de Langerhans del páncreas, las encargadas de segregar la insulina, y, como consecuencia, se reduce la producción de esta hormona hasta niveles insuficientes. Puesto que la función de la insulina es introducir la glucosa en el interior de las células, los niveles de glucosa en la sangre se disparan (hiperglucemia).

Hasta hace poco, se pensaba que cuando se diagnosticaba la enfermedad los pacientes habían perdido la inmensa mayoría (el 85 o 95 por ciento) o casi todas las células β. Sin embargo, trabajos recientes en los que se han empleado técnicas más sensibles para medir los niveles de péptido C (cadena de aminoácidos que se escinde durante la síntesis de insulina y cuya concentración en sangre nos informa sobre la actividad de las células β) y estudios histológicos del páncreas de diabéticos han demostrado que numerosos pacientes, en el momento del diagnóstico, e incluso tras muchos años de evolución de la enfermedad, retienen cierta capacidad para producir insulina. Además, se ha visto que en el páncreas pueden coexistir, en distintas proporciones según el paciente, islotes pancreáticos sin células β, otros con células β y signos de inflamación, e incluso otros normales. Ello indica que las células β que quedan podrían recuperar su función, por lo que, en teoría, la DM1 podría convertirse en una enfermedad reversible.

Por tanto, las terapias para la curación de la diabetes deberían ir enfocadas hacia dos objetivos. Primero, detener el ataque del sistema inmunitario a las células β y proteger a las que se forman de nuevo ante los sucesivos ataques, todo ello sin sacrificar la respuesta defensiva del paciente frente a agentes infecciosos o de otro tipo; esta estrategia recibe la denominación de inmunoterapia. En segundo lugar, se deberían generar nuevas células β a partir de las todavía existentes o producirlas a partir de nuevas fuentes celulares, este enfoque es el que se conoce como terapia celular de la diabetes.

INMUNOTERAPIA: DEFENDERSE DE LAS PROPIAS DEFENSAS

Para poder diseñar estrategias de inmunoterapia resulta esencial conocer cómo se produce el ataque autoinmunitario. Se sabe que ocurre de un modo silencioso, durante un tiempo variable, antes de que la enfermedad se manifieste clínicamente. En él parti-

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

cipan numerosos componentes del sistema inmunitario, como los autoantígenos (proteínas de la membrana de las propias células β) y varios tipos de células, entre ellas los macrófagos, las células dendríticas, los linfocitos B y los linfocitos T.

Se piensa que la secuencia de eventos se inicia con la liberación de autoantígenos de las células β como consecuencia del daño causado en ellas por virus, bacterias u otros factores ambientales. Los autoantígenos son procesados y expuestos en sus membranas por las células presentadoras de antígenos (macrófagos, células dendríticas o linfocitos B), que se infiltran en los islotes pancreáticos y provocan una inflamación localizada en ellos denominada insulitis. Después, en el sistema linfático pancreático, los autoantígenos son reconocidos por cierta población de linfocitos T, los linfocitos coadyuvantes $CD4^+$. Estos últimos son activados por la interleucina-12, liberada por los macrófagos y las células dendríticas.

A continuación, los linfocitos $CD4^+$ activados liberan, por un lado, interleucina-2, sustancia que, a su vez, activa a otra población de linfocitos T, los linfocitos citotóxicos $CD8^+$. Estos actúan de modo específico contra las células β, ya que producen unas sustancias, las citolisinas, que las matan. Por otro lado, los linfocitos T $CD4^+$ segregan interferón-γ, una proteína inmunitaria que hace que los macrófagos se vuelvan citotóxicos. Estos liberan citocinas (sustancias que regulan el mecanismo de la inflamación), como la interleucina-1, y radicales libres que dañan a las células β. De este modo, los macrófagos, los linfocitos T y las citocinas actúan de una manera sinérgica para destruir a las células β.

Para defender al organismo del ataque autoinmunitario se están desarrollando estrategias de inmunoterapia. La idea que hay detrás de ellas es eliminar los linfocitos T citotóxicos $CD8^+$ para que no arremetan contra las células β (tolerancia pasiva) y, al mismo tiempo, inducir resistencia ante el ataque inmunitario (tolerancia activa), todo ello sin que se produzcan los efectos secundarios causados por una inmunodepresión a largo plazo. En la tolerancia activa se persigue promover la acción de otras células, los linfocitos T reguladores, que desempeñan una importante función protectora: por un lado, reducen la ofensiva de los linfocitos T citotóxicos $CD8^+$ y, por el otro, incrementan la liberación de otra molécula, la interleucina 10, que inhibe la síntesis de citocinas proinflamatorias segregadas por los linfocitos T y los macrófagos citotóxicos.

Las inmunoterapias se están articulando en torno a varios ejes y hasta ahora se han realizado con ellas más de 40 ensayos clínicos en pacientes. El primero de los ejes es la vacunación, en la que se administran autoantígenos exógenos para que desencadenen la misma respuesta inmunitaria que se pretende regular. En este sentido, los ensayos realizados han tratado de inducir tolerancia frente a la insulina y frente a GAD65, una de las isoformas de la enzima glutamato descarboxilasa, que interviene en la función de las células β. En general, estos ensayos consiguen al principio preservar el funcionamiento de las células β, mejorar el control glucémico y que los pacientes necesiten menos insulina. Por desgracia, no logran frenar el avance de la enfermedad ni el ataque autoinmunitario.

El segundo eje se basa en reducir la respuesta inflamatoria. Se han realizado ensayos con vitamina E, nicotinamida (vitamina del complejo B) y vitamina D3. Estas sustancias se han administrado solas, combinadas entre sí, o combinadas entre sí y, además, aplicadas junto con una terapia intensiva de insulina. Este enfoque consigue unos efectos muy pobres y da la impresión de que se podría emplear más como estrategia de apoyo que como terapia fundamental.

El tercer eje contempla actuar contra los linfocitos T $CD4^+$ mediante el desarrollo de anticuerpos (sustancias producidas por el sistema inmunitario que atacan a los antígenos). Se pretende que los anticuerpos arremetan contra los receptores de estos linfocitos, de modo que dejen de reconocer los autoantígenos. Se interrumpe así la cadena de reacciones citotóxicas que llevan a la muerte de las células β y, en el proceso se estimula a la vez la formación de linfocitos T reguladores. Los ensayos llevados a cabo con esta estrategia tienen unos resultados más esperanzadores, ya que, un año después de su inicio, los pacientes mantienen mejor la función de sus células β residuales, presentan una glucemia más controlada y necesitan una menor cantidad de insulina exógena.

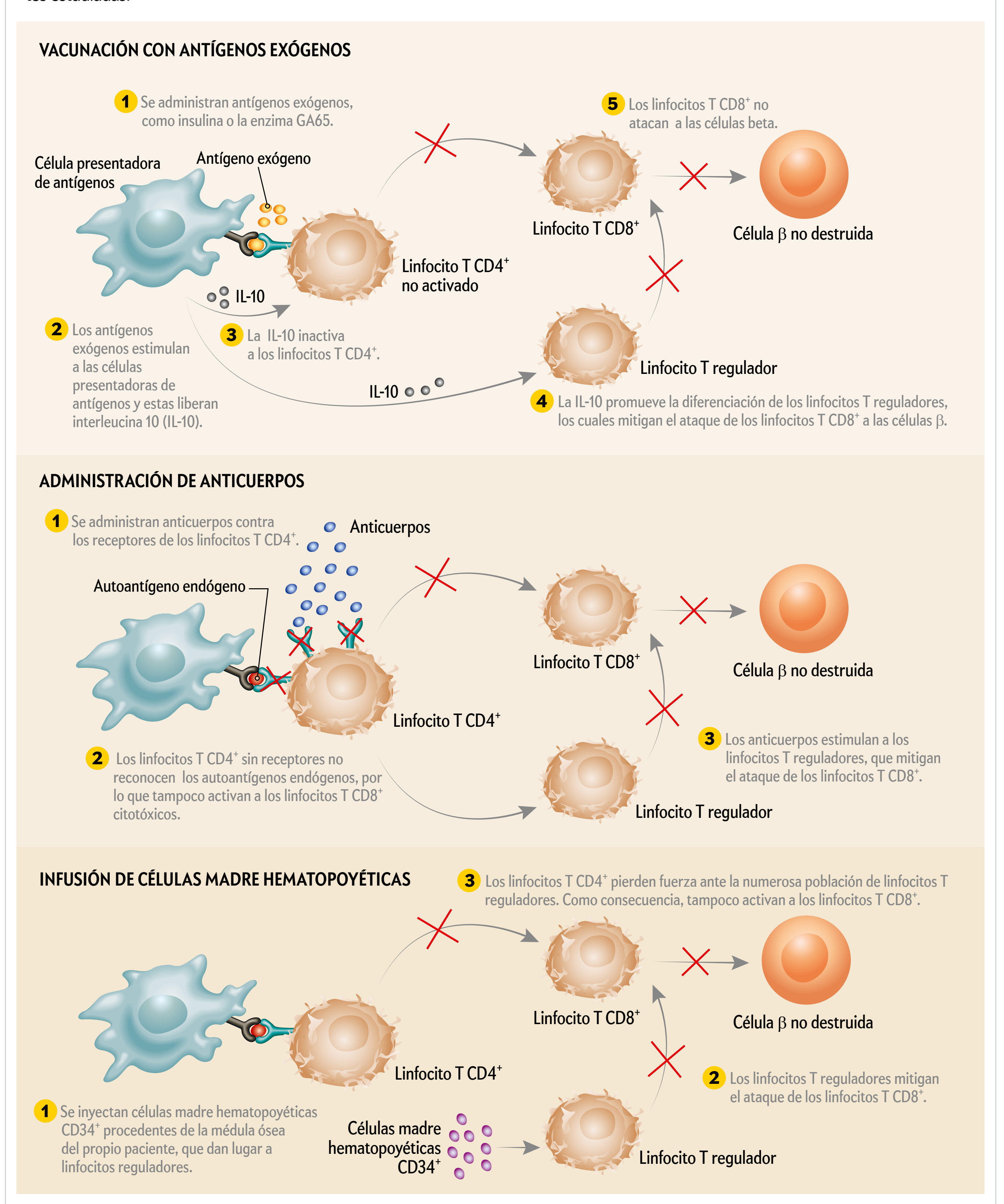
El cuarto eje consiste en manipular las citocinas que activan a los linfocitos T y que intervienen en la inflamación y en la muerte de las células β. Se han diseñado moléculas frente a alguna de las citocinas que ya se están empleando en ensayos. No obstante, en ellos se ha observado que la masa de células β no parece conservarse. Esto indicaría que dirigirse contra una citocina no parece que vaya a curar la DM1 ni que resulte de mucha utilidad, debido a la implicación de otras citocinas proinflamatorias con una función redundante.

El último eje puesto en marcha es el trasplante de células madre, también conocidas como células troncales, que tienen la capacidad de inducir inmunotolerancia, tanto activa como pasiva. Hasta ahora, se han realizado ensayos clínicos en los que se han introducido en los pacientes células que poseen efectos inmunomoduladores, esto es, con la capacidad de inhibir a las células presentadoras de antígenos e incrementar la población de linfocitos T reguladores. Se han realizado trasplantes con células autólogas (del propio paciente) procedentes del cordón umbilical, así como con células madre mesenquimales adultas (células multipontentes, con capacidad de diferenciarse en cualquier tipo de célula), obtenidas de la médula ósea y del cordón umbilical.

Mención aparte merece el trasplante de células madre hematopoyéticas autólogas, o protocolo AHSCT, por sus siglas en inglés. El proceso consiste en mobilizar, desde la médula ósea hasta la sangre periférica, células madre hematopoyéticas $CD34^+$ del propio paciente. Se trata de células madre pluripotentes presentes en la médula ósea y que son capaces de producir todos los tipos celulares propios de la sangre. Cuando los niveles de estas células $CD34^+$ han alcanzado en la sangre periférica unos valores suficientemente altos, son recolectadas mediante un proceso de separación denominado leucaféresis y posteriormente se congelan. A continuación, se induce una destrucción parcial del sistema inmunitario del paciente (proceso denominado inmunoablación) para finalmente trasplantar al paciente sus propias células $CD34^+$ descongeladas. En los pacientes a los que se ha aplicado este protocolo se ha visto una mayor tolerancia frente a los autoantígenos de los islotes pancreáticos y una disminución en los niveles circulantes de citocinas proinflamatorias. En cuatro ensayos clínicos ha demostrado una eficacia bastante alta y una gran seguridad. En todos los casos se ha conseguido conservar la masa de células β y mejorar el control glucémico a los dos años de la intervención. Además, en dos de esos ensayos, llevados a cabo en China, Brasil y Polonia, un porcentaje notable de los pacientes no necesitó administrarse insulina durante 20 meses. Los éxitos alcanzados con este tipo de tratamiento parecen indicar que la DM1 podría curarse. Sin embargo, se necesita seguir investigando en este camino, ya que los ensayos clínicos con AHSCT fueron

Restaurar y potenciar las defensas

Las estrategias de inmunoterapia que se están investigando pretenden, por un lado, frenar en alguno de sus pasos la cadena de reacciones que llevan a la destrucción de las células β y, por otro, favorecer los mecanismos propios del sistema inmunitario que tienden a contrarrestar el ataque, como la producción de linfocitos T reguladores. Se ilustran aquí tres de las estrategias más importantes estudiadas.



diseñados para adultos y no para niños y se han llevado a cabo en grupos pequeños de pacientes.

TERAPIA CELULAR: RESTABLECER LAS CÉLULAS β

Dado que en la DM1 se produce una pérdida de células β, una opción para curar la enfermedad consiste en reponer las células destruidas. Esta idea no es nueva. Hace más de un siglo, Oskar Minkowski y Josef von Mering, de la Universidad de Estrasburgo, propusieron una solución quirúrgica: el trasplante de páncreas. Las primeras operaciones con éxito se llevaron a cabo en la década de los sesenta del pasado siglo. Sin embargo, la intervención presentaba una tasa de mortalidad elevada. Pronto llegaría una solución. Paul Lacy y David Scharp, de la Universidad de Washington, junto con John Najarian y David Sutherland, de la Universidad de Minnesota, en 1980 tuvieron la idea visionaria de trasplantar islotes pancreáticos. Los primeros ensayos clínicos con islotes de donantes recién fallecidos comenzaron una década después. Desde 1980 hasta 2000, las técnicas de aislamiento y conservación de islotes de donantes, su trasplante a los enfermos y el uso de fármacos inmunodepresores para evitar el rechazo fueron mejorando. De esta manera, el número de pacientes trasplantados, así como el éxito de esta estrategia fue creciendo, aunque con una gran variabilidad. A partir del 2000, con la aplicación del protocolo de Edmonton, introducido por el equipo de James Shapiro, de la Universidad de Alberta, se consiguió un avance muy importante que ha permitido que, en la actualidad, aproximadamente la mitad de los pacientes trasplantados puedan vivir hasta cinco años sin necesidad de insulina. Además, los que han vuelto a necesitarla muestran un mejor control metabólico, requieren menores cantidades de insulina, padecen menos episodios de hipoglucemias graves o inadvertidas y, en algunos casos, se benefician de una progresión más lenta de las complicaciones asociadas a la enfermedad.

No obstante, el trasplante de islotes tiene que superar varios obstáculos. El más importante es disponer de una fuente de células β lo suficientemente grande para que se convierta en una opción terapéutica para todos los pacientes. Además, deben mejorarse las técnicas de aislamiento y conservación de los islotes; hay que identificar los factores o compuestos que aumentan la supervivencia y funcionalidad a largo plazo de los islotes trasplantados; hace falta buscar otros lugares donde trasplantar los islotes (actualmente, se trasplantan en el hígado a través de la vena porta); debe reducirse la toxicidad de los fármacos inmunodepresores que se usan para evitar el rechazo; y, por último, se necesitan dispositivos, formados por nuevos biomateriales, que aíslen en el organismo los islotes trasplantados y los protejan del ataque inmunitario. De hecho, por todos los obstáculos mencionados, la Asociación Americana de Diabetes todavía no considera el trasplante de islotes como una opción terapéutica aplicable a la población, sino que la sitúa dentro del campo de los ensayos clínicos. En la actualidad, la investigación en este campo está muy activa y hay unos diez ensayos clínicos en marcha para tratar de superar las limitaciones señaladas. En este sentido, dos de los autores (Soria y Martín) están desarrollando protocolos que permiten replicar in vitro las células β presentes en los islotes pancreáticos humanos aislados de donantes cadavéricos. Ello reduciría el número de donantes necesarios para poder realizar trasplantes. Además, otro de los autores (Montanya) trabaja en aspectos relacionados con la mejora de las técnicas de aislamiento y conservación de los islotes que se van a trasplantar, así como en la supervivencia de los ya trasplantados.

Por consiguiente, es importante fijarse en otros medios de obtener células secretoras de insulina lo más parecidas posible a las células β, cuya disponibilidad sea elevada y resulte suficiente para el trasplante. Una forma de lograrlo radica en extraer células de distintos orígenes y, a partir de estas, crear células β. Existen dos grandes enfoques, que no son excluyentes, para conseguirlo: en uno la fuente de células es de origen pancreático, mientras que en el otro la procedencia es de otros tejidos del propio paciente.

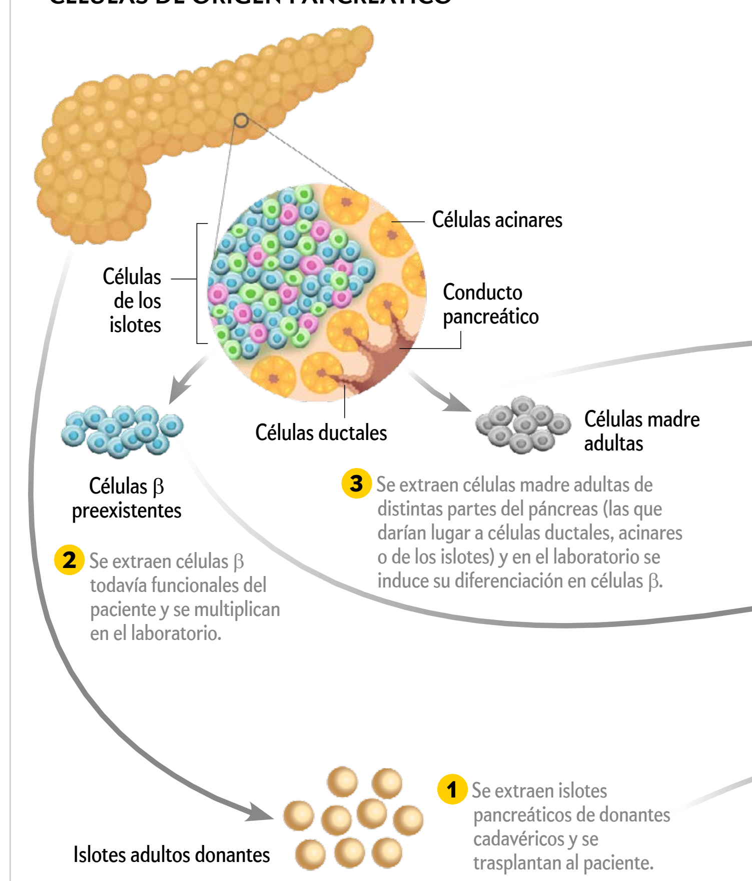
El primer enfoque contempla varias posibilidades. Una es la replicación in vitro de células β todavía funcionales del paciente. Otra consiste en generar células β a partir de células progenito-

TERAPIAS CELULARES

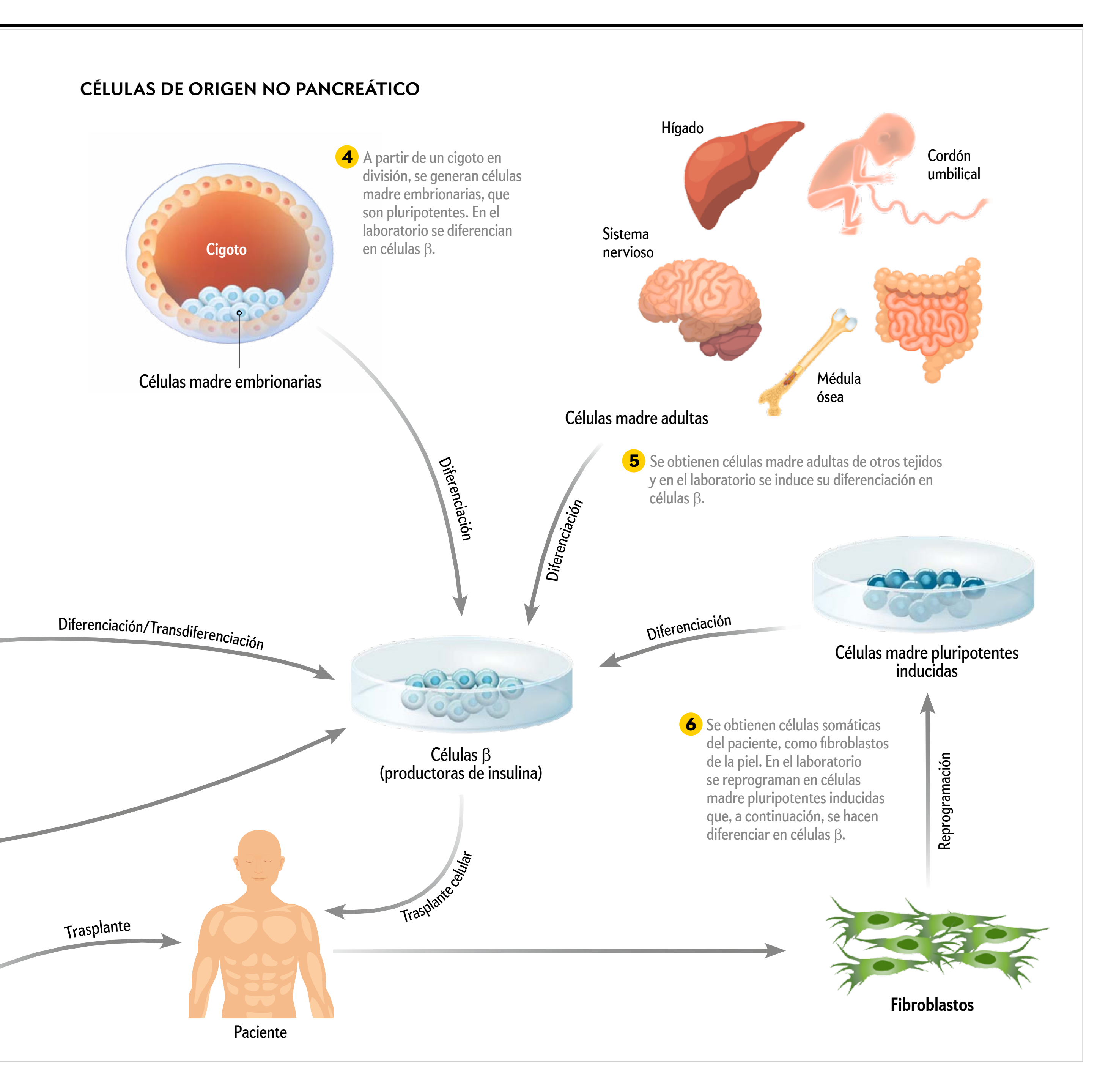
Cómo obtener y trasplantar células β

El objetivo de la terapia celular es restaurar la masa de células β destruidas por el propio sistema inmunitario mediante un trasplante de estas células en el paciente. Estas pueden proceder de donantes o generarse de nuevo a partir de otras, generalmente del propio paciente. Y pueden ser del mismo páncreas (origen pancreático), o bien de otros órganos (origen no pancreático). Según la procedencia, se emplean distintas técnicas para crear las células β, las productoras de insulina: la diferenciación, la transdiferenciación y la reprogramación.

CÉLULAS DE ORIGEN PANCREÁTICO



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA



ras (células madre presentes en los tejidos que se diferencian en un solo tipo de célula). Estas pueden corresponder a las células que dan lugar a las células ductales (de los conductos pancreáticos), a los islotes, o bien a las células acinares (encargadas de sintetizar y excretar las enzimas digestivas del páncreas). Y, una tercera opción es la transdiferenciación, esto es, la obtención de células β a partir de otras células ya diferenciadas del páncreas, bien de los islotes, fundamentalmente las células α (productoras de glucagón), o bien de los acinos (formados por células acinares) [*véase* «Retos de la medicina regenerativa», por María José Barrero y Juan Carlos Izpisúa; Investigación y Ciencia, noviembre de 2012].

En el segundo enfoque, basado en fuentes celulares no pancreáticas, se crean células productoras de insulina a partir de células madre pluripotentes (aquellas que dan lugar a la mayoría de los tejidos). Para esta opción se pueden emplear células madre embrionarias o células adultas. Estas últimas pueden proceder del hígado, del intestino, del sistema nervioso, de la médula ósea, de la sangre o del cordón umbilical.

Las distintas estrategias arriba comentadas han demostrado su mayor o menor eficacia en modelos animales con diabetes (fundamentalmente ratones). No obstante, su aplicación en humanos está siendo mucho más complicada. Dos de los autores (Soria y Martín), publicaron hace quince años los estudios pioneros sobre la obtención de células productoras de insulina a partir de células madre embrionarias. Demostraron el concepto de que era posible obtener, a partir de células madre embrionarias, células que liberaban insulina en respuesta a los

estímulos fisiológicos propios de la hormona que se reproducían en el laboratorio. Dichas células normalizaban la glucemia cuando se trasplantaban a modelos de ratones diabéticos. En la actualidad, los mismos autores han desarrollado protocolos mas eficaces, rápidos y menos costosos que permiten obtener un mayor número de células productoras de insulina a partir de células madre embrionarias.

Existe otra opción, la de usar células madre de pluripotencia inducida (CMPI). Se obtienen a partir de células adultas de los propios pacientes, que se reprograman y se transforman en células pluripotentes, por lo que pueden ser diferenciadas a continuación hacia células secretoras de insulina. Los autores de este artículo han desarrollado protocolos que permiten generar células productoras de insulina a partir de CMPI. La estrategia tiene la ventaja de que las células proceden del propio paciente y no exigiría la administración de fármacos inmunodepresores para evitar el rechazo. Sin embargo, estos protocolos tienen una alta dificultad técnica y todavía no han alcanzado la madurez suficiente para su aplicación en la práctica clínica [*véase* «Una década de reprogramación celular», por Megan Scudellari; Investigación y Ciencia, octubre de 2016]. Los autores han desarrollado protocolos que permiten generar células productoras de insulina a partir de estas CMPI.

Una cuestión importante pendiente de resolver sobre las distintas estrategias basadas en células madre es si resulta más ventajoso crear a partir de ellas células β totalmente funcionales en el laboratorio, y después trasplantarlas, o, en vez de ello, desarrollar células precursoras de células β, que luego, al trasplantarlas en un lugar adecuado junto con ciertos factores u otras células, maduren hasta convertirse en células β funcionales. Las investigaciones en curso parecen indicar que esta segunda alternativa es más factible, debido a las dificultades que hay para obtener una célula β completamente funcional mediante procedimientos in vitro. Esta alternativa, además, ha abierto un amplio abanico de posibilidades debido a los distintos tipos de células que se pueden cotrasplantar para ayudar a la supervivencia del trasplante. Por ejemplo, se ha visto que las células madre mesenquimales procedentes de la médula ósea constituyen un excelente aliado, ya que son fáciles de aislar y expandir en cultivo, no son inmunogénicas (no inducen una reacción inmunitaria), presentan propiedades inmunodepresoras, activan la inmunotolerancia y liberan factores de crecimiento o citocinas con propiedades antiinflamatorias y antiapoptóticas.

Para que la terapia celular de la DM1 se convierta en una realidad deben superarse todavía varias barreras. Hay que mejorar los protocolos para obtener, a un coste no muy elevado, grandes poblaciones de células secretoras de insulina que sean puras, eficaces y seguras. Y también es necesario diseñar protocolos unificados que permitan trasplantar estas células en lugares adecuados, protegidas del ataque inmunitario, de modo que la supervivencia del trasplante sea la mayor posible. Ello supone desarrollar dispositivos de encapsulación biocompatibles, donde se incluyan las células de interés junto con otras moléculas y células que mejoren la eficacia del trasplante. Para salvar estos obstáculos hay que llevar a cabo más ensayos preclínicos en modelos animales, así como ensayos clínicos en humanos.

En la actualidad, la empresa ViaCyte, en California, está llevando a cabo un ensayo clínico en fase I/II (NCT02239354), en el que participan 40 pacientes, que pretende comprobar la seguridad de un dispositivo implantado subcutáneamente durante dos años y valorar su eficacia a través de la medida de los niveles plasmáticos de péptido C. El dispositivo en cuestión está formado por una membrana porosa pero impermeable a las células y en su interior alberga células precursoras de los islotes, obtenidas a partir de células madre embrionarias humanas. La idea es que, tras su implantación en el paciente, las células maduren no solo hacia células secretoras de insulina, sino también hacia los otros tipos de células que forman parte de los islotes pancreáticos.

¿HABRÁ UN FUTURO SIN DIABETES?

Tras haber revisado las numerosas iniciativas que hay en marcha para hacer frente a la enfermedad, cabe preguntarse si daremos finalmente con una solución para eliminarla de forma definitiva. Sin embargo, tal pregunta resulta difícil de responder, al igual que otras que nos podamos formular, como cuánto tiempo se tardará en hallar una cura o por qué todavía no la hemos descubierto. Tal vez una pregunta más pertinente es si la curación de la DM1 está en camino. A este respecto nos gusta ser optimistas, ya que las pruebas presentadas en este artículo así lo indican.

Probablemente la curación, entendida como la capacidad de controlar la glucemia y a la vez mantener una calidad y esperanza de vida igual a la de las personas que no padecen la enfermedad, pase por la combinación de las estrategias de inmunoterapia y terapia celular. Además, es posible que no exista una única pauta terapéutica que sirva para todos los pacientes.

Los retos que nos esperan son formidables. Tal vez en la marcha hacia la curación de la diabetes nos detengamos en encrucijadas o, por el contrario, hallemos atajos. Trasladar a la cabecera del paciente los avances de la investigación probablemente lleve tiempo. No obstante, la ilusión y el esfuerzo son grandes y cada paso que damos nos acerca más a nuestro sueño. En el camino, no olvidamos la célebre frase de Julio Verne, que aparece en *Viaje al centro de la Tierra*: «La ciencia, muchacho, está llena de errores, pero de errores útiles de cometer, pues, poco a poco, conducen a la verdad». IyC

PARA SABER MÁS

Insulin-secreting cells derived from embryonic stem-cells normalize glycaemia in streptozotocin-induced diabetic mice. Bernat Soria et al. en *Diabetes*, vol. 49, págs 157-162, 2000.
IDF diabetes atlas, 7.ª edición, 2015.
The rise, fall and resurgence of immunotherapy in type 1 diabetes. M. Ben Nasr et al en *Pharmacological Research*, vol. 98, págs. 31-38, 2015.
Using stem cells to produce insulin. B. Soria et al. en *Expert Opinion on Biological Therapy*, doi: 10.1517/14712598.2015.1066330, 2015.
The streetlight effect in type 1 diabetes. M. Battaglia y M. A. Atkinson en *Diabetes*, vol. 64, págs. 1081-1090, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

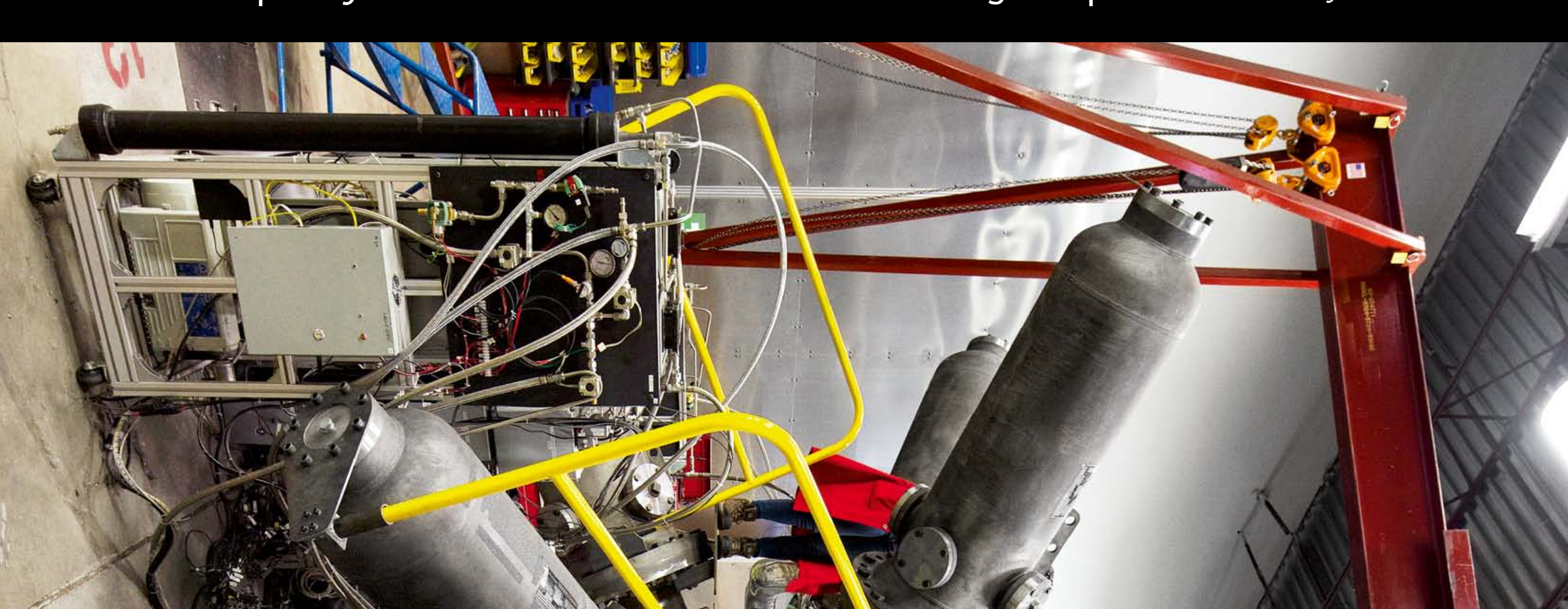
Causas de la diabetes. Abner L. Notkins en *IyC*, enero de 1980.
Origen de la diabetes. Mark A. Atkinson y Noel K. Maclaren en *IyC*, septiembre de 1990.
Tratamiento de la diabetes por trasplante celular. Paul E. Lacy en *IyC*, septiembre de 1995.
Diabetes. Genética y terapia. Miguel Torres y Antonio Serrano en *IyC*, agosto de 1998.

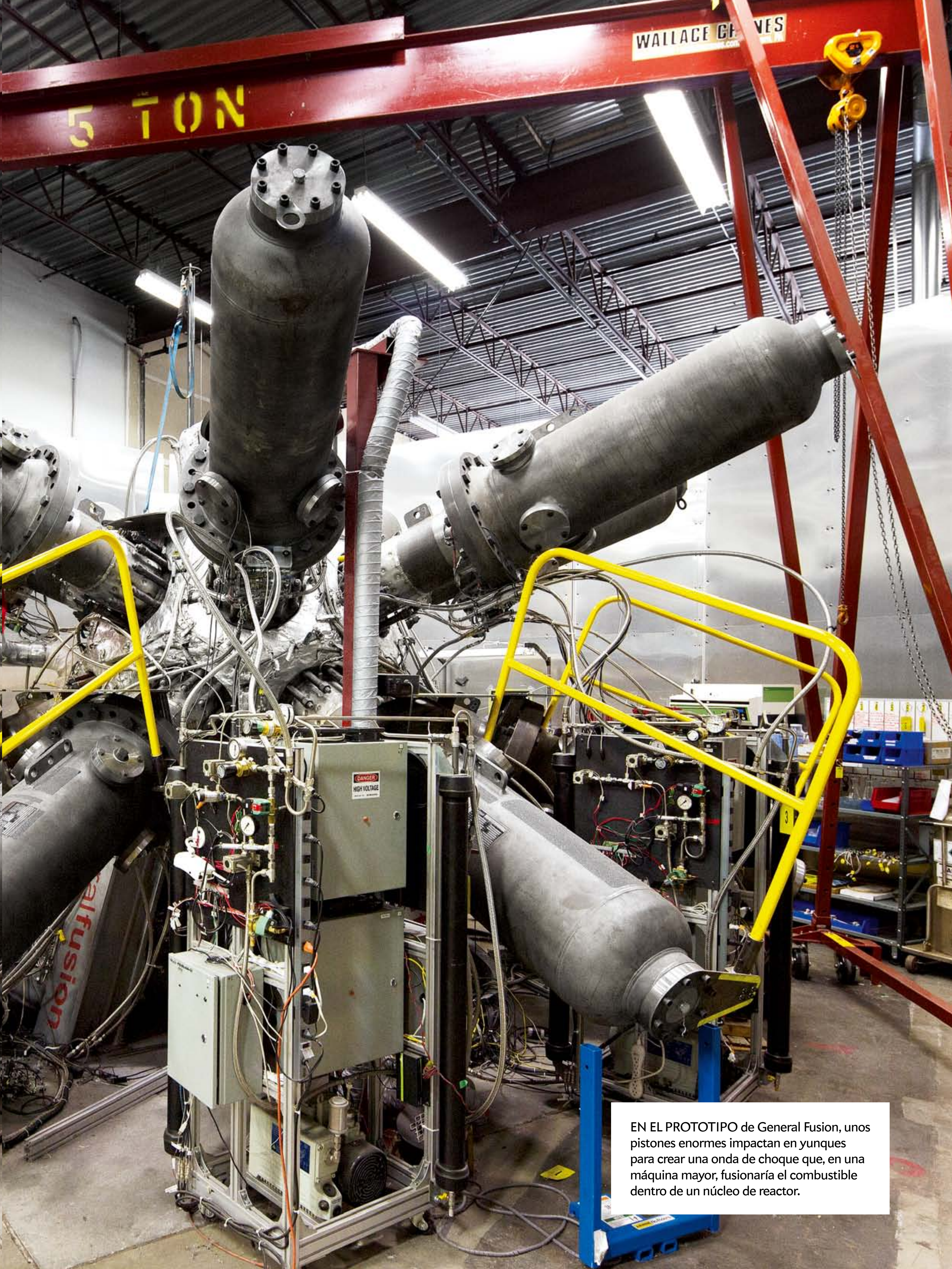
ENERGÍA

LA FUSIÓN ALTERNATIVA

Unos pocos físicos audaces, financiados algunos por multimillonarios, exploran vías más rápidas y baratas hacia la fuente definitiva de energía limpia

W. Wayt Gibbs





EN EL PROTOTIPO de General Fusion, unos pistones enormes impactan en yunques para crear una onda de choque que, en una máquina mayor, fusionaría el combustible dentro de un núcleo de reactor.

Voy poniéndome un poco

nervioso mientras hacemos los preparativos para el encendido. Estoy sentado en la sala de control del reactor de fusión experimental de Tri Alpha Energy. Tengo delante unos monitores de ordenador que llevan etiquetas donde se lee «cañones de plasma» o «control de disparo». El reactor es un prototipo inicial de central eléctrica que genera energía mediante una versión controlada de lo que ocurre en el interior de las estrellas y las bombas de hidrógeno.

W. Wayt Gibbs es divulgador científico. Colabora con *Scientific American* y es el director editorial de Intellectual Ventures, una firma de inversiones e investigación que posee una filial dedicada a la energía de fisión (no fusión).



En la señal de vídeo de una pantalla colgada en alto, veo a unos operarios que se apartan del voluminoso reactor y se dirigen hacia la salida de este almacén de Irvine, en California. La resplandeciente cámara de vacío cilíndrica, en el centro del reactor, tan larga como dos autobuses aparcados en fila, está rodeada por dos docenas de electroimanes anulares, cada uno más alto que yo y gruesos como una pierna. A una orden mía, la temperatura se elevará dentro de la cámara a unos 10 millones de grados, aunque tan solo por un instante.

«Pulsa ese botón», me indica el operario. Obedezco. En un edificio adyacente, cuatro enormes volantes de inercia, que han adquirido su velocidad de rotación impulsados por la energía de la red local, liberan 20 megavatios de electricidad. La corriente excita los imanes anulares y carga una serie de robustos condensadores, dejándolos listos para la inminente y enorme andanada. En menos de dos minutos, todos los medidores de la pantalla de control han pasado de «Preparando» a «Armado».

El operario se inclina sobre un micrófono. «Disparar», se oye por los altavoces, y las luces de advertencia empiezan a parpadear. Muevo el cursor hasta el botón que reza «Disparar». Lo pulso. Los condensadores liberan en un microsegundo la electricidad que tienen acumulada. En los extremos opuestos del cilindro de vacío se forman nubes de iones de hidrógeno que son propulsadas hacia el centro a casi un millón de kilómetros por hora. Allí colisionan y producen un plasma caliente y giratorio, moldeado como un gigantesco cigarro hueco.

Dicho así parecerá un espectáculo dramático, pero en la sala de control no se ve destello alguno ni se oye ningún estampido, sino tan solo un débil sonido metálico, un «ping», como si a alguien dentro de la sala del reactor se le hubiera caído una llave inglesa al suelo de hormigón. Al cabo de un instante, la masa de plasma ya se ha disipado y los ordenadores empiezan a procesar el *gigabyte* de datos transmitidos desde las docenas de sensores instalados en el reactor. Las luces de advertencia se apagan y los operarios regresan a sus tareas.

Se trata tan solo de otro disparo en pos de la fusión. Cuando se efectúan hasta cien al día, tal y como ha estado haciendo Tri Alpha, uno más no significa gran cosa.

Tras 50.000 «pings» en tan solo dos años, la máquina de pruebas C-2U había proporcionado al equipo de Tri Alpha en el momento de mi visita en febrero de 2016, todos los datos necesarios para seguir adelante. En abril, Michl Binderbauer, el principal responsable técnico de la firma, ordenó a sus ingenieros que la desmontaran y reutilizaran sus piezas en un reactor más avanzado (apodado C-2W) que, según se prevé, estará terminado a mediados de 2017.

La estrategia de Tri Alpha (construir un prototipo rápidamente, probarlo solo lo suficiente y luego progresar a uno mejor) supone una notable desviación de la norma en cuanto a la investigación en fusión se refiere. Durante decenios, científicos del ámbito académico han diseñado máquinas ciclópeas con el propósito de resolver los misteriosos comportamientos de los abrasadores plasmas presurizados, que supuestamente deberían originar reacciones de fusión pero que, a menudo, no lo hacen. Binderbauer, hijo de un emprendedor vienés, ilustra una nueva raza de científicos expertos en fusión, estimulada por los inversores, la mentalidad de ingeniero y el afán de centrarse en la construcción de una central nuclear práctica en vez de en erigir un monumento a la física de altas energías.

Otras empresas emergentes, como General Fusion, radicada en las afueras de Vancouver, están asimismo apostando por la creación de una máquina comercial sin la necesidad de desentrañar todos los detalles de la compleja física del proceso. Una central de fusión nuclear de ese tipo funcionaría con combustibles procedentes del agua del mar o de minerales comunes, prácticamente inagotables y que no contienen carbono, por lo que estas centrales apenas emitirían gases de efecto invernadero. Además, apenas si supondrían algún riesgo de emisiones de radiación o de uso armamentístico, y generarían suficiente electricidad para abastecer ciudades enteras todo el día, todos los días. Lo único que los nuevos pioneros necesitan hacer es resolver algunos de los problemas físicos y de ingeniería más difíciles que se hayan abordado nunca.

En estos momentos, los pragmáticos gozan de la atención pública, pues los académicos han alcanzado callejones sin salida

EN SÍNTESIS

Los proyectos de fusión nuclear a gran escala —el ITER en Francia, el NIF en Estados Unidos— han gastado miles de millones de dólares y aún no se hallan cerca de generar la suficiente energía para mantener siquiera su propio funcionamiento, no digamos ya para generar energía que se pueda vender.

En la actualidad se están explorando diseños más pequeños y simples, en algunos casos realizados por compañías privadas. Los resultados preliminares han despertado las esperanzas de que puedan existir vías más prácticas y baratas para construir centrales nucleares de fusión.

Sin embargo, los recién llegados se enfrentan a obstáculos científicos abrumadores, como evitar que la turbulencia en el interior de los plasmas supercalentados detenga las reacciones de fusión nada más iniciarse estas. Además, el tránsito desde los experimentos breves al funcionamiento continuo y fiable requerido en las centrales eléctricas también plantea formidables retos de ingeniería.

PÁGINAS PRECEDENTES: CHRIS MUELLER

en la práctica: reactores enormes que han aclarado aspectos de la ciencia de la fusión, pero que no se hallan en vías de poder verter electricidad a la red para mediados de siglo. Un ejemplo lo constituye el Centro Nacional de Ignición (NIF, por sus siglas en inglés) del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore, una máquina que ha costado 4000 millones de dólares y bombardea diminutas cápsulas de combustible con pulsos láser de billones de vatios. «El NIF solo efectúa unos pocos cientos de disparos al año», comenta Binderbauer. Una central eléctrica, en cambio, tendría que disparar decenas de miles de veces al día. El sistema ha aportado investigaciones útiles sobre armas (el objetivo primario), pero la producción de energía tendría que multiplicarse por un factor de casi 30.000 solo para cubrir el consumo de los láseres, y aún se requeriría mucha más para que resultara comercialmente útil. Hace dos años, Livermore abandonó la idea de diseñar un prototipo de central eléctrica.

El segundo ejemplo desalentador es el ITER, una máquina de diez pisos de altura que un consorcio de países está construyendo en Francia. Este reactor contará con enormes imanes superconductores para controlar un plasma a 150 millones de grados durante varios minutos cada vez. Aunque tenga éxito, no generará electricidad.

Los políticos que en 2006 lanzaron el proyecto ITER esperaban que costara 11.000 millones de dólares y que su construcción se completase el año pasado. Para mayo, el presupuesto había ascendido a los 20.000 millones de dólares y se prevé que el reactor no entre en pleno funcionamiento hasta 2035 como pronto. En EE.UU., que debía contribuir con unos 5000 millones, los frustrados senadores votaron 90 contra 8 a favor de retirar la financiación. Sin embargo, en el momento de escribir este artículo, tras un posterior aunque cauto voto de confianza por parte del Departamento de Energía, el Congreso parecía dispuesto a continuar en el proyecto, al menos hasta el próximo año.

Prevenidos por el lentísimo progreso de los colosos, Binderbauer y los demás inconformistas depositan sus esperanzas en aparatos más pequeños que enfocan el problema desde nuevos ángulos. Para satisfacer las expectativas, han de comprimir densamente una diminuta cantidad de combustible, calentado a suficiente temperatura y confinado el tiempo necesario para que los átomos se fusionen y transformen con ello parte de su minúscula masa en un raudal de energía. El NIF y el ITER se hallan en los extremos opuestos del espectro de diseños factibles, el cual abarca un amplio abanico de densidades de plasma y tiempos de confinamiento de la energía (una medida de cuánto permanece el calor en el plasma). La mayoría de los recién llegados están buscando un punto óptimo en la región central, menos explorada.

No menos importante es que las nuevas empresas estén concebidas para triunfar o fracasar bastante deprisa. Sus reactores son «en potencia, 100 veces más baratos que el ITER, más fáciles de construir y se prestan a mayores avances en la investigación», explica Scott Hsu, físico experto en fusión del Laboratorio Nacional de Los Álamos que trabaja con HyperV Technologies, otra empresa emergente (en el diseño de esta compañía, cientos de cañones disparan ráfagas de plasma de argón al centro de un reactor esférico, donde convergen y comprimen el combustible de hidrógeno).

Cualquier defecto fatal de estos proyectos muy probablemente se manifestará mucho antes de que las inversiones asciendan a miles de millones de dólares y décadas de tiempo. Eso complace a los inversores. El capital de General Fusion, unos 100 millones de dólares, proviene en parte del fundador de Amazon, Jeff Bezos, del Gobierno canadiense y del fondo soberano de inversión de Malasia. Tri Alpha afirma que ha recaudado cientos de millones de dólares de inversores, entre los que se encuentran Goldman Sachs y Paul Allen, cofundador de Microsoft. Otro grupo muy dinámico, el de los Laboratorios Nacionales Sandia, cuenta con el apoyo de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada para la Energía (ARPA-E) de Estados Unidos, que financia iniciativas aventuradas del mismo modo que un inversor de capital riesgo. Los patrocinadores están haciendo apuestas de alto riesgo y alto beneficio potencial.



MICHEL LABERGE, fundador y científico principal de General Fusion, muestra un instrumento de diagnóstico que ayuda a examinar teorías físicas no comprobadas.

CHRIS MUELLER

FUEGO COMPRIMIDO

La dificultad de estabilizar un plasma surge de la propia naturaleza de la fusión. Dos núcleos atómicos solo pueden fusionarse si se acercan lo bastante y durante el tiempo suficiente para que la atracción de la fuerza nuclear entre ellos venza la repulsión electromagnética entre los protones. Cuando eso ocurre, los iones se unen y forman un único núcleo de un elemento más pesado, cuya masa es menor que la suma de las masas de los componentes iniciales. La materia perdida se transforma así en una generosa cantidad de energía, la cual se desprende en forma de fotones y partículas subatómicas rápidas. Los reactores de fisión, en cambio, extraen energía de elementos como el uranio, dividiendo sus átomos en lugar de uniéndolos.

Para conseguir velocidades de fusión elevadas, los iones del plasma deben moverse uno hacia el otro con rapidez, pero no excesiva. Eso se traduce típicamente en temperaturas del plasma superiores a los 100 millones de grados. En un reactor hay que introducir a presión el plasma supercalentado dentro de un espacio reducido, en el interior de una cámara de vacío, y mantener allí los núcleos hasta que ocurran las reacciones. Como regla práctica, el producto de la densidad del plasma y el tiempo de confinamiento ha de superar los 10^{14} segundos por centímetro cúbico. Por tanto, valdrían amplias combinaciones de densidades, tiempos y temperaturas.

Los nuevos reactores de fusión

Varios grupos audaces están construyendo prototipos de máquinas de fusión para transformar minúsculas porciones de materia en un raudal de energía (*izquierda*). Los Laboratorios Nacionales Sandia (*abajo*) y la empresa en ciernes General Fusion (*derecha, abajo*) buscan crear plasmas calientes que emitan neutrones de alta energía con los que se generaría electricidad. El enfoque de Tri Alpha Energy (*derecha, arriba*) generaría principalmente rayos X. Los diseños expuestos aquí son para reactores de tipo comercial.

LA MATERIA SE TRANSFORMA EN ENERGÍA

Cuando dos núcleos (deuterio y tritio, por ejemplo) colisionan a la velocidad adecuada, se fusionan para dar un núcleo de un elemento más pesado (helio) cuya masa es menor que la masa total de los componentes iniciales . La fusión convierte esa masa perdida en energía, la cual es transportada por fotones y partículas rápidas (neutrones).

SANDIA: APLASTAR EL COMBUSTIBLE

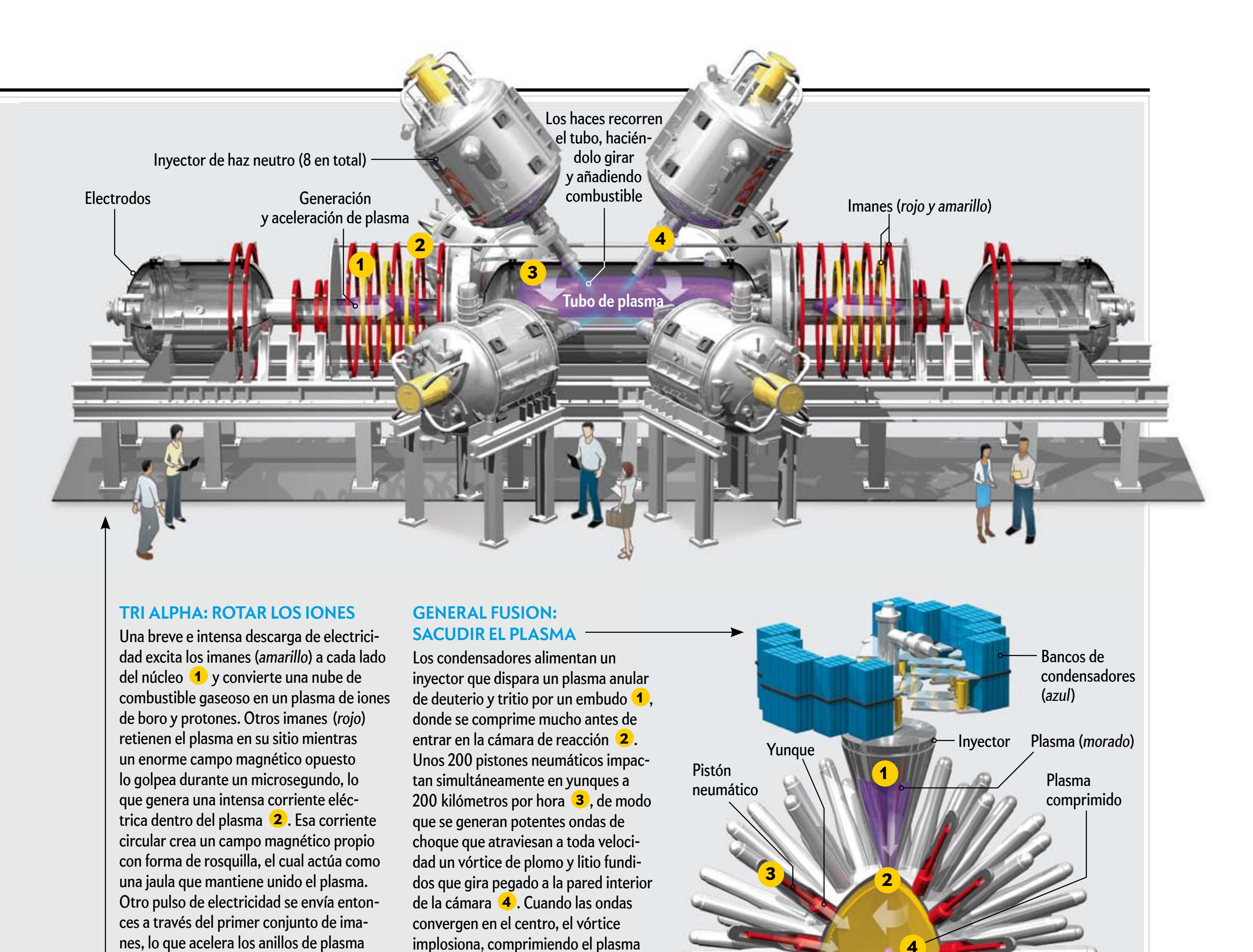
Noventa conjuntos de condensadores y líneas de transmisión **1** disparan a la cámara del reactor **2** un pulso coordinado de corriente de una intensidad de 65 millones de amperios. Se crean así potentes campos magnéticos en torno a una pequeña cápsula cilíndrica de metal que contiene el combustible frío de deuterio y tritio. Uno de los campos se contrae alrededor del eje vertical del cilindro (*azul*), del tamaño de la goma de un lápiz, y lo hace implosionar en tan solo 100 nanosegundos **3**. Un segundo campo retiene el combustible para que no escape **4**. A medida que el combustible empieza a colapsar, un destello de luz láser verde de un billón de vatios **5** lo precalienta durante unos diez nanosegundos. La implosión lleva entonces el combustible hasta la temperatura de fusión y se produce una ráfaga de neutrones de alta energía. En una central nuclear, el proceso tendría que repetirse varias veces por minuto.

El ITER, un reactor de tipo tokamak, utilizará un plasma poco denso de aproximadamente medio gramo de deuterio y tritio (isótopos de hidrógeno ricos en neutrones) que flotará en una cámara de vacío del tamaño de una casa pequeña. El ITER apunta a una baja densidad de plasma y a confinamientos de energía del orden de segundos.

El NIF, por el contrario, dispara rayos láser con una potencia de 500 billones de vatios desde 192 direcciones sobre una diminuta cápsula cilíndrica que recubre una porción congelada de deuterio y tritio sólidos. El sistema óptico y electrónico que crea y guía los pulsos de láser ocupa un edificio de 30 metros de altura que podría albergar tres campos de fútbol. Para conseguir la ignición (el estado en el cual el combustible libera la energía suficiente para mantener las reacciones de fusión sin ayuda externa), el NIF busca una densidad de plasma increíblemente alta; la necesita porque el confinamiento se obtiene solamente por inercia, durante apenas una fracción de nanosegundo.

Según Patric McGrath, director del programa de ARPA-E, podría hallarse una gran oportunidad en el régimen menos explorado que se sitúa entre los dos extremos: una densidad de plasma y unos tiempos de confinamiento de la energía mo-

ILUSTRACIONES DE DON FOLEY (*reactors*) Y JEN CHRISTIANSEN (*particle diagram*)



TRI ALPHA: ROTAR LOS IONES

Una breve e intensa descarga de electricidad excita los imanes (*amarillo*) a cada lado del núcleo 1 y convierte una nube de combustible gaseoso en un plasma de iones de boro y protones. Otros imanes (*rojo*) retienen el plasma en su sitio mientras un enorme campo magnético opuesto lo golpea durante un microsegundo, lo que genera una intensa corriente eléctrica dentro del plasma 2. Esa corriente circular crea un campo magnético propio con forma de rosquilla, el cual actúa como una jaula que mantiene unido el plasma. Otro pulso de electricidad se envía entonces a través del primer conjunto de imanes, lo que acelera los anillos de plasma hacia el centro, donde chocan unos contra otros a aproximadamente un millón de kilómetros por hora. La colisión produce un plasma mayor y más caliente con forma de tubo 3, el cual debe alcanzar los 350 millones de grados para que se desencadene la fusión. Ocho inyectores disparan haces de átomos neutros hacia los bordes del tubo para mantenerlo rotando alrededor de su eje 4, añaden combustible nuevo y estabilizan el plasma mientras arde durante horas o días y emite rayos X y núcleos de helio de alta energía.

GENERAL FUSION: SACUDIR EL PLASMA

Los condensadores alimentan un inyector que dispara un plasma anular de deuterio y tritio por un embudo 1, donde se comprime mucho antes de entrar en la cámara de reacción 2. Unos 200 pistones neumáticos impactan simultáneamente en yunques a 200 kilómetros por hora 3, de modo que se generan potentes ondas de choque que atraviesan a toda velocidad un vórtice de plomo y litio fundidos que gira pegado a la pared interior de la cámara 4. Cuando las ondas convergen en el centro, el vórtice implosiona, comprimiendo el plasma a unos 150 millones de grados y a una presión que supera los cinco millones de atmósferas, suficiente para iniciar la fusión durante una fracción de segundo. El metal líquido captura los neutrones y el calor liberado por la reacción. El proceso entero se repetiría una vez cada segundo y generaría neutrones de alta energía.

derados. Sin embargo, ninguna máquina ha llegado a dominar los duendes de la turbulencia y la inestabilidad que inevitablemente aparecen en tales plasmas. Controlar un plasma caliente mientras la fusión ruge en su interior es como intentar apretar la llama de una vela sin tocarla, pero más difícil todavía, puesto que en un plasma los iones generan corrientes eléctricas y campos magnéticos propios, complejos y que perturban el sistema. «Aunque se consiga que la vela se encienda, se apagará ella sola», explica Dylan Brennan, del Laboratorio de Física de Plasmas en Princeton, del Departamento de Energía de EE.UU.

LOS ADVENEDIZOS ENTRAN EN ESCENA

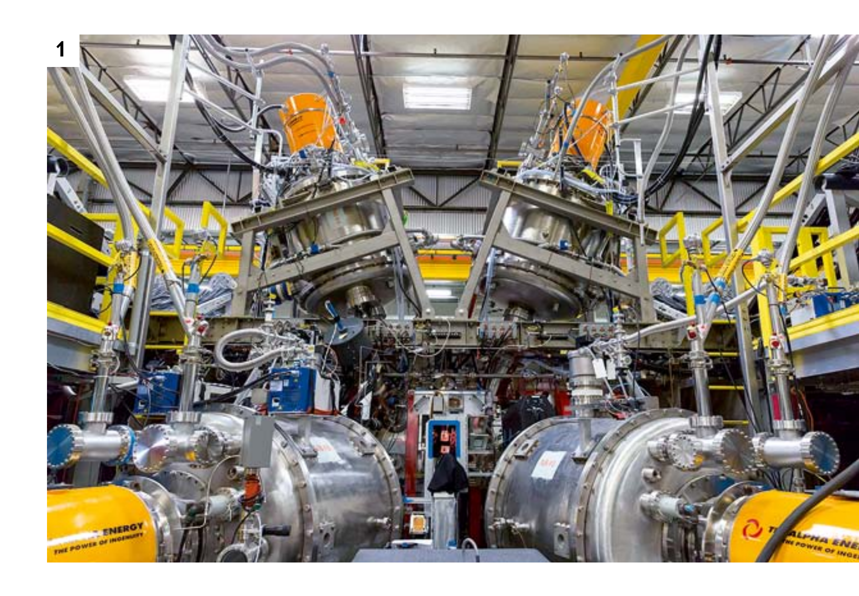
De las empresas emergentes, Tri Alpha destaca por haber mostrado el mayor progreso en mantener un control fiable sobre el plasma. «Todo lo que ve aquí se construyó en menos de un año», me informa Binderbauer con orgullo mientras recorremos los 23 metros de longitud de la máquina C-2U, diminuta en comparación con el NIF o el ITER. Tan solo tres meses después de encenderla, ya estaba creando hasta 100 amasijos giratorios de plasma de hidrógeno al día, cada uno con una densidad de aproximadamente la mitad del valor perseguido por la firma, 10^{14} iones por centímetro cúbico. El plasma así

generado permanece estable y caliente durante cinco milisegundos.

Esas condiciones distan mucho de la visión que tiene la compañía de un plasma que rote tranquilamente en su sitio durante días o semanas. Sin embargo, las pruebas se vieron limitadas por el suministro energético externo. «Nada indica que no pueda continuar todo el tiempo que queramos», asegura Binderbauer, refiriéndose a un reactor a escala real que se alimente a sí mismo además de a la red eléctrica. El aparato mejorado C-2W añadirá retroalimentación digital para contrarrestar la tendencia de la masa de plasma a temblar o desplazarse.

Hsu, que no trabaja para Tri Alpha, opina que la compañía ha realizado un progreso tremendo: «Esencialmente, han resuelto el problema de la estabilidad». Sin embargo, demostrar que pueden alcanzar tiempos de contención prolongados —y a temperaturas muy superiores, al tiempo que se va introduciendo una corriente estacionaria de combustible— resultará crucial, puesto que el reactor debe operar en modo continuo para generar electricidad.

1



CORTESÍA DE TRI ALPHA ENERGY, INC.

El reactor de General Fusion, en cambio, funciona con pulsos. La cámara de reacción, una esfera de acero erigida en un almacén de las afueras de la ciudad, mide un metro de diámetro y está erizada de pistones de unos treinta centímetros de ancho, cada uno casi tan largo como un hombre alto. Michel Laberge, fundador y científico jefe de la compañía, describe así la máquina, de aspecto retrofuturista: «Un gas comprimido acelera los pistones hasta los 200 kilómetros por hora. Entonces golpean en los yunques y... ¡pum!», exclama a la vez que da una ruidosa palmada. Todos los impactos tienen que ocurrir en menos de cinco microsegundos para crear una onda de choque que converja en el centro exacto de la cámara.

Cuando se hayan incorporado todas las piezas de la máquina, estas dispararán una vez por segundo, como un corazón palpitante. Con cada latido, un anillo de plasma lanzado al interior de la esfera se comprimirá y desencadenará una breve pero energética cascada de reacciones de fusión. Laberge razona que resulta más fácil controlar la turbulencia usando esta estrategia de pulsos, puesto que cada pequeña rosquilla de plasma tan solo ha de permanecer estable durante un milisegundo aproximadamente.

Laberge dice que el sistema inyector ya ha producido plasmas que tienen la densidad correcta antes de la implosión, así como la temperatura y la intensidad del campo magnético necesarias. Sin embargo, los plasmas aguantaban solo 20 microsegundos (50 veces más breves de lo previsto) antes de sucumbir a la inestabilidad. Laberge confía en que un nuevo diseño de la boquilla, con una forma más parecida al pabellón de una trompeta, retorcerá el campo magnético creado por el propio plasma en la medida justa para mantener unido el combustible y durante el tiempo suficiente para que se fusione.

Aun así, «mucha gente que trabaja en este campo afirma que el enfoque de General Fusion nunca va a funcionar», señala Brennan, que está ayudando a la compañía. Los críticos dudan de que un pequeño grupo de personas de una empresa joven pueda dominar los problemas planteados por el plasma que han frustrado la investigación académica durante años. «Pero, científicamente, ¿tenemos la certeza de que no podrán hacerlo?», pregunta Brennan. «No.»

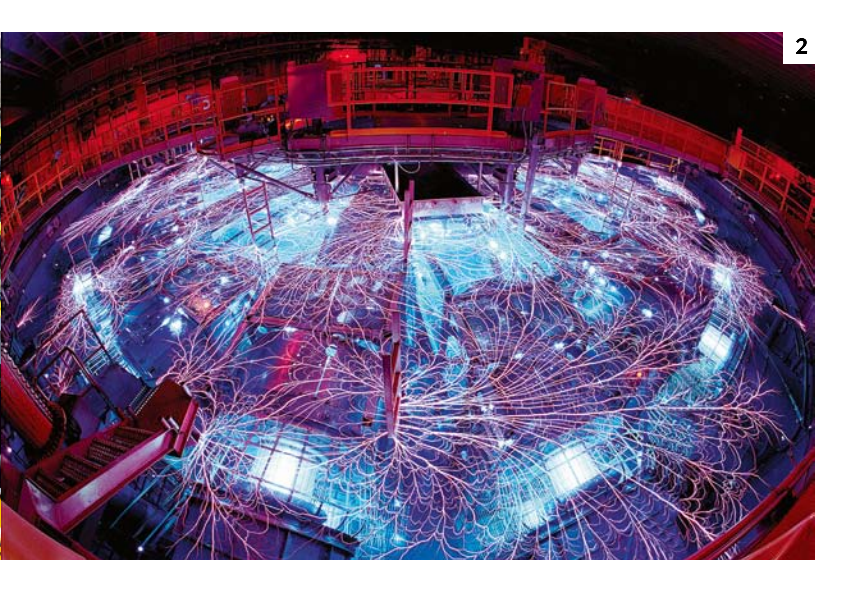
A medio continente de distancia, en los Laboratorios Sandia de Nuevo México, una serie de experimentos con una técnica llamada MagLIF han logrado lo que aún constituye la asignatura pendiente de las nuevas compañías: producir fusión en cantidades apreciables. Al igual que el NIF, la técnica MagLIF opta por densidades altas (del orden de 10^{24} iones por centímetro cúbico) y tiempos de confinamiento de pocos nanosegundos. Pero el sistema de Sandia, de 34 metros de ancho, es mucho más pequeño y barato que el del NIF debido a que emplea una estrategia de golpear con un uno-dos para calentar y presurizar el combustible, atrapado en el interior de una cápsula cilíndrica no mayor que la goma de un lápiz.

La denominada Máquina Z que alimenta al MagLIF suelta una descarga eléctrica de 19 millones de amperios, la cual ejerce un potente pinzamiento magnético y aplasta el cilindro. Un breve destello láser de un billón de vatios ioniza el combustible en el momento en que empieza a implosionar. La máquina impone un campo magnético separado para evitar que el chorro de plasma resultante salga por los extremos del cilindro. Sin embargo, al aplastarse, el cilindro puede desarrollar inestabilidades que permitan que el combustible escape por los lados.

La cantidad de fusión generada en cada disparo de MagLIF se ha centuplicado desde que comenzaron los ensayos, a finales de 2013. «MagLIF funciona ya bastante bien», comenta Hsu. En el momento de escribir este artículo, Daniel Sinars, el líder del proyecto, esperaba resultados aún mejores en los disparos de finales de 2016. Si todo va bien, el equipo planea aumentar la intensidad de la descarga eléctrica hasta los 25 millones de amperios. Eso debería producir del orden de 10^{16} reacciones de fusión, lo suficiente para compensar la energía absorbida por el combustible durante el proceso, igualando el logro alcanzado por el NIF en 2014 con apenas una fracción del coste. «Sería muy emocionante», reconoce Sinars.

Sandia ya está trazando planes para mejorar la Máquina Z. Con 65 millones de amperios y la adición de tritio al combustible de deuterio empleado hasta la fecha, la nueva Z800 podría generar hasta 100.000 veces más energía por disparo. ¿Basta para conseguir la ignición, para alcanzar la fusión autosostenida diez años antes que el ITER? Los investigadores de Sandia creen que sí podrían conseguirlo.

Dado que Sandia es un laboratorio nacional, cualquier actualización sustancial debe ser aprobada por el Congreso de EE.UU., que ha estado decantándose por no gastar. Sin embargo, la competencia podría alterar esa forma de ver las cosas. Stephen A.



2

LOS INYECTORES (*amarillos y plateados*) de Tri Alpha (*1*) disparan haces de átomos que hacen girar un plasma de fusión caliente con el fin de mantenerlo estable en el interior del núcleo del reactor. La Máquina Z de Sandia (*2*) genera pulsos cortos de una intensa corriente eléctrica que crea fuertes campos magnéticos para comprimir el combustible de la fusión.

CORTESÍA DE RANDY MONTOYA, SANDIA NATIONAL LABORATORIES

Slutz, teórico principal del proyecto de Sandia, explica que China ya ha construido un modelo de Z más pequeño y está replicando los experimentos publicados de Sandia; asimismo, Rusia planea construir una máquina similar de 50 millones de amperios.

ELEVAR LA TEMPERATURA

Si cualquiera de estos métodos de fusión logra alcanzar la densidad iónica y el tiempo de confinamiento necesarios, aún deberá aportar el tercer ingrediente que se requiere para la ignición: una temperatura de plasma increíblemente alta. Hacerlo resulta difícil, puesto que las emisiones lumínicas, las interacciones entre electrones y una miríada de mecanismos pueden enfriar el plasma hasta el punto de detener las reacciones de fusión poco después de que empiecen.

En Sandia, por ejemplo, Sinars y Slutz han estado devanándose los sesos para averiguar la razón por la que el láser no calienta el combustible tanto como predicen sus modelos. Cabe la posibilidad de que la estrecha ventana que cubre el extremo abierto de la diana de combustible esté dispersando la luz. No obstante, pudiera suceder simplemente que un láser no sea la herramienta adecuada para la tarea. En un sistema comercial, «probablemente convendría calentar el combustible de alguna otra manera», admite Sinars. El equipo intenta mejorar el calentamiento por láser, pero, si no lo consigue, al menos el fracaso habrá llegado en una etapa temprana.

Tri Alpha ha de alcanzar una temperatura mucho más alta que sus competidores, ya que emplea un combustible mixto de protones y boro-11 que requiere 3500 millones de grados; es decir, una temperatura más de 20 veces mayor que la que necesita el combustible de deuterio y tritio.

La contención de los plasmas más calientes tiende a presentar más dificultades, pero Binderbauer apuesta por que el confinamiento de la energía de Tri Alpha mejorará conforme suba la temperatura. Así ha ocurrido en los experimentos hasta la fecha. Pero incluso la nueva máquina C-2W solo podrá calentar los plasmas a menos del 1 por ciento de la temperatura necesaria y mantenerlos durante apenas 30 milisegundos. Binderbauer reconoce que podría perder esta apuesta sobre física, pero señala que aún no hay de datos en ese régimen. «Tenemos que confirmarlo», apunta.

General Fusion también debe luchar contra una física no comprobada; en particular, la de la rapidez a la que el calor escapa del plasma. «No puede calcularse a partir de primeros principios, así que hay cabida de sobra para una mala sorpresa o para una buena», asegura Laberge. «Si las pérdidas de calor son peores de lo previsto, podremos aumentar el tamaño de la máquina. Pero si esta crece hasta ser como el ITER, tendremos un problema.»

DEL PROTOTIPO A LA CENTRAL ELÉCTRICA

El día en que algún reactor consiga la ignición se descorcharán botellas de champán. Pero, acto seguido, los ingenieros tendrán un largo y arduo camino por delante para transformar un reactor experimental en una central nuclear que genere electricidad y, al mismo tiempo, dé beneficios. Para que su efecto se perciba en el suministro de electricidad en el mundo, que se prevé que habrá crecido un 70 por ciento hacia el año 2040, la fusión tendrá que competir en costes con otras opciones de energía limpia.

Los gigantescos reactores de tipo tokamak, como el ITER, probablemente nunca tendrán éxito, apunta Dennis Whyte, director del Centro de Fusión y Ciencia del Plasma del Instituto de Tecnología de Massachusetts, pues consumen demasiada potencia. Las nuevas empresas han tomado más en cuenta las cuestiones referentes a la ingeniería, pero de todas formas tendrán que afrontar numerosas dificultades prácticas.

En el futuro previsible, por ejemplo, cada disparo del MagLIF de Sandia destruirá parte del equipo. La fusión de deuterio y tritio libera la mayor parte de su energía en forma de neutrones de alta velocidad, y estos dañan las piezas de acero, las cuales se tornan gradualmente radiactivas. Toda central nuclear de fusión que utilice esta clase de combustible tendrá que capturar los neutrones rápidos y emplear su energía térmica para hacer girar las turbinas generadoras de electricidad y, a la vez, minimizar los efectos secundarios. Los científicos de Sandia aún no están enfrascados en el asunto de cómo prevenir el daño, y solo tienen ideas crudas y no verificadas sobre cómo podrían acelerar la velocidad de disparo y pasar de varios por semana a varios por minuto. HyperV y Magneto-Inertial Fusion Technologies, una pequeña empresa de Tustin, en California, están utilizando dinero de ARPA-E para explorar métodos afines que podrían solucionar algunos de estos problemas, pero sus intentos no han avanzado demasiado.

Tri Alpha persigue una fusión de protones y boro precisamente para evitar los dolores de cabeza que acompañan a los neutrones rápidos. La fusión con este combustible emite tres núcleos de helio, conocidos como partículas alfa (de ahí el nombre de la compañía) y rayos X, pero casi ningún neutrón. La desventaja radica en que los rayos X se llevan el 80 por ciento de la energía producida.

En principio, dice Binderbauer, revistiendo el interior del recipiente con células fotovoltaicas se podría convertir estos fotones en electricidad. Sin embargo, esta tecnología aún no existe, de modo que la compañía está explorando la idea de hacer circular un refrigerante por la pared interior de la cámara de fusión para extraer el calor depositado por los rayos X.

General Fusión no abandona el combustible de deuterio y tritio, a pesar del problema de los neutrones y de que el tritio es ligeramente radiactivo, sumamente raro y muy costoso. Para capturar la energía de los neutrones, Laberge planea bombear un vórtice de plomo y litio fundidos que gire pegado a las paredes interiores de la cámara de reacción. Los neutrones dividirán también algunos de los átomos de litio en helio y tritio, que podría reciclarse como combustible.

Se trata de una solución elegante en la pizarra, pero nunca se ha construido un sistema semejante. Hsu dice que solo se puede especular sobre la cantidad de tritio que se produciría. Y a Laberge le preocupa que, cuando las ondas de choque de los pistones pasen a través de la mezcla de plomo y litio, parte del metal pueda salpicar al plasma y sofocar la fusión. «Sería como echar agua al fuego», reconoce.

VÍAS MENOS TRANSITADAS

Teniendo en cuenta el decepcionante ritmo del ITER y el NIF, Whyte argumenta que ha llegado el momento de reunir todo el conocimiento científico acumulado y dirigir la vista hacia otras opciones, incluidas variaciones de los reactores de tipo tokamak que reducen su tamaño o que les confieren extrañas formas, convirtiéndolos en «esteleradores». «Me encantaría contemplar una carrera entre un tokamak muy pequeño, la idea de General Fusion, un estelerador pequeño y una máquina como la de Tri Alpha, a ver cuál funciona mejor.»

Actualmente, en Estados Unidos dicha carrera depende de la generosidad de los inversores. El dinero federal para las vías alternativas se ha ido reduciendo año tras año, apunta Hsu. Tanto él como Stewart Prager, director del laboratorio de física de plasmas de la Universidad de Princeton, han instado al Congreso a incrementar los fondos para explorar ideas innovadoras relativas a la fusión, lo que permitiría que otras empresas emergentes y ambiciosas afrontaran el reto. Si cualquiera de las concepciones innovadoras tiene éxito, «la energía de fusión podría desarrollarse, posiblemente por unos pocos miles de millones de dólares, en menos de 20 años», aventura Hsu.

Quizá sí, quizá no. Como señala Binderbauer, «la física que aún desconocemos tiene mucho margen para ponerse en contra de nosotros».

Sin embargo, considérese la ganancia potencial: una nueva fuente de energía que no dependería de los caprichos del viento ni de las nubes, que no exigiría grandes cambios en la red eléctrica existente, que no suscitaría preocupaciones sobre las armas nucleares, cuyo núcleo no podría fundirse ni irradiar a las poblaciones circundantes, y que no sería más cara, una vez puesta en marcha, que otras formas de energía limpia. ¿No vale la pena intentar unos cuantos disparos más? IyC

PARA SABER MÁS

Plasma physics: The fusion upstarts. M. Mitchell Waldrop en *Nature*, vol. 511, págs. 398-400, julio de 2014.
Scaling magnetized liner inertial fusion on Z and future pulsed-power accelerators. S. A. Slutz et al. en *Physics of Plasmas*, vol. 23, n.º 2, art. 022702, febrero de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Las dificultades de la fusión nuclear. Michel Moyer en *IyC*, mayo de 2010.
Las piezas ausentes del proyecto ITER. Geoff Brumfiel en *IyC*, enero de 2013.


hola
adios
mamá
papá
X
¿Por qué?
sí
NO
¿Qué?
X
¿Dónde está el...?
Perro Balón

LINGÜÍSTICA

HACIA UNA NUEVA VISIÓN DEL LENGUAJE

Buena parte de la revolucionaria teoría de Noam Chomsky, incluida su explicación sobre la manera en que los niños adquieren el lenguaje, se está desmoronando

Paul Ibbotson y Michael Tomasello

La teoría de que nuestro cerebro nace equipado con una plantilla predefinida para adquirir la gramática, famosamente defendida por Noam Chomsky, ha dominado la lingüística durante casi medio siglo. Hace poco, sin embargo, numerosos lingüistas y científicos cognitivos han comenzado a abandonar en manada la idea de que exista una «gramática universal». El detonante han sido varias investigaciones relativas a un gran número de lenguas, así como sobre la manera en que los niños comienzan a entender y a hablar el idioma de su comunidad. Los resultados de tales estudios no respaldan el paradigma chomskiano.

Esas investigaciones han alumbrado una visión completamente nueva del lenguaje, en la que su adquisición por parte del niño no depende de un módulo gramatical innato. En su lugar, los pequeños se convertirían en hablantes competentes gracias a varios recursos cognitivos que bien podrían no estar relacionados en absoluto con el lenguaje. Entre ellos se encontrarían la facultad para ordenar el mundo en categorías o para discernir relaciones entre cosas. Tales capacidades, unidas al talento único del ser humano para captar aquello que otros intentan comunicar, posibilitarían el lenguaje. Los nuevos hallazgos indican que,

EN SÍNTESIS

Hace décadas, Noam Chomsky revolucionó la lingüística con su célebre teoría de la gramática universal. Esta postula que el cerebro humano viene dotado de una «plantilla mental» para la gramática.

Sin embargo, los postulados de Chomsky han sido cuestionados por su dificultad para explicar los datos empíricos. A lo largo de los años, su teoría ha sido objeto de varios cambios para encajar las críticas.

Un nuevo enfoque, conocido como lingüística basada en el uso, propone explicar la adquisición del lenguaje a partir de las facultades cognitivas de los niños y de su capacidad para interpretar las intenciones del interlocutor.

OWEN GILDERSLEEVE

si realmente queremos entender cómo lo adquieren los niños, hemos de abandonar las teorías de Chomsky.

Esta conclusión es importante, ya que el estudio del lenguaje desempeña un papel nuclear en varias disciplinas (desde la poesía hasta la inteligencia artificial, pasando por la propia lingüística), pero métodos erróneos conducen a resultados cuestionables. Además, el lenguaje es empleado por el ser humano en proporciones que ningún otro animal puede emular. Por tanto, si lográsemos entender qué es, habríamos aprendido algo más sobre la naturaleza humana.

La primera versión de la teoría de Chomsky, presentada a mediados del siglo xx, encajó bien con dos tendencias intelectuales que entonces emergían en Occidente. Primero, postulaba que las lenguas naturales se comportaban como los lenguajes de base matemática del entonces incipiente campo de la computación. Así pues, las investigaciones de Chomsky se centraron en buscar la estructura computacional subyacente al lenguaje humano y propusieron la existencia de un conjunto de procedimientos para generar frases «bien formadas». Lo revolucionario fue pensar que un programa de tipo informático sería capaz de producir frases que las personas reconoceríamos como gramaticales. De ser así, dicho programa también podría explicar la manera en que los humanos generamos las frases. Ese modo de pensar cautivó a numerosos expertos de la época, dispuestos a adoptar un punto de vista computacional sobre... prácticamente todo.

Pero, además, Chomsky postuló que la gramática universal se encontraba arraigada en la biología humana. En la segunda mitad del siglo xx, se hizo cada vez más evidente que nuestra singular historia evolutiva era la responsable de muchos de los aspectos de nuestra también singular psicología, por lo que las teorías de Chomsky resonaron asimismo a ese nivel. Su gramática universal fue presentada como un componente innato de la mente humana que prometía revelar las bases biológicas de los más de 6000 idiomas del mundo. Y, en ciencia, las teorías más potentes, por no hablar de las más bellas, suelen revelar la unidad oculta que subyace a la diversidad. Como consecuencia, las teorías de Chomsky gustaron de inmediato.

Sin embargo, las pruebas han terminado por superar al paradigma chomskiano, que desde hace años viene padeciendo una muerte lenta. Su ocaso procede tan despacio porque, como apuntó en su día el físico Max Planck, los investigadores más veteranos suelen aferrarse a las viejas maneras de hacer ciencia: «La ciencia progresa de funeral en funeral».

NACIMIENTO DE UNA TEORÍA

Las primeras encarnaciones de la gramática universal, en los años sesenta, tomaron como punto de partida las lenguas europeas «comunes»: las mismas que hablaban la mayoría de los lingüistas interesados en el tema. Por tanto, dicha investigación comenzó a operar con fragmentos como los sintagmas nominales (*los perros bonitos*) y los verbales (*quieren gatos*).

No obstante, relativamente pronto comenzaron a aparecer idiomas que no encajaban en ese pulido esquema. Algunas lenguas indígenas australianas, como el warlpiri, mostraban elementos gramaticales esparcidos por toda la frase: sintagmas nominales y verbales que no estaban «empaquetados» con la nitidez necesaria para conectarlos con la gramática universal, así como frases que incluso carecían de verbo. Aquellos casos supuestamente atípicos eran difícilmente reconciliables con la teoría de Chomsky, cuya construcción se había basado en la estructura de los idiomas europeos. Otras excepciones llegaron con las lenguas ergativas: idiomas como el vasco o el urdu, los cuales marcan el sujeto de un modo muy distinto a como lo hacen la mayoría de las lenguas europeas. Una vez más, aquello desafiaba la noción de una gramática universal.

Tales hallazgos, junto con algunos trabajos teóricos, obligaron a Chomsky y a sus seguidores a revisar la noción de gramática universal. Durante los años ochenta elaboraron una nueva versión de la teoría, bautizada como «principios y parámetros», la cual reemplazaba esa gramática común por un conjunto de principios, también universales, que gobernarían la estructura del lenguaje. Dichos principios, no obstante, se manifestarían de forma diferente en cada lengua. Una analogía sería que todos nacemos con idéntica capacidad para distinguir los mismos sabores básicos (dulce, salado, ácido, amargo y umami), pero la interacción con la cultura, la historia y la geografía hace que ello derive en la gran diversidad de la gastronomía mundial. Los principios y los parámetros serían el equivalente lingüístico de los sabores. Después, las particularidades de cada cultura —y con independencia de si un niño aprende inglés o japonés— producirían la variedad lingüística existente en el mundo y, al mismo tiempo, definirían el conjunto de lenguas posibles.

Por ejemplo, algunos idiomas, como el español, permiten formar frases perfectamente gramaticales sin necesidad de hacer explícito el sujeto. En la oración *Tengo zapatos*, el sujeto queda indicado por la *-o* final del verbo. Chomsky sostenía que, cuando un niño se encontrase con unas pocas construcciones de este tipo, en su cerebro se activaría un «interruptor» que le indicaría que el sujeto puede elidirse. De esta forma, sabría que es posible hacerlo en todas las frases. Ese «parámetro de elisión del sujeto» también parece determinar otras características estructurales del idioma. Sin embargo, aunque la noción de principios universales se ajusta bastante bien al funcionamiento de numerosas lenguas europeas, otras no encajan con esta revisión de la teoría. De hecho, fue la línea de investigación que intentaba identificar dichos parámetros lo que acabó por forzar el abandono de la segunda encarnación de la gramática universal.

Más tarde, en un célebre artículo publicado en *Science* en 2002, Chomsky y sus colaboradores describieron una gramática universal que solo incluía una característica: la «recursividad computacional» —si bien hoy muchos investigadores siguen defendiendo la existencia de un gran número de principios y parámetros comunes—. Este nuevo cambio se fundaba en el proceso que permite combinar un número finito de palabras y reglas para formar una cantidad ilimitada de frases.

Esa infinidad de posibilidades aparece porque la recursividad del lenguaje permite anidar una frase en otra del mismo tipo. Por ejemplo, en numerosos idiomas pueden incrustarse subordinadas a la derecha: *Juan espera que María sepa que Pedro está mintiendo*. En teoría, es posible continuar engastando oraciones de este tipo hasta el infinito. La comprensión comenzará a resentirse cuando apilemos demasiadas, pero Chomsky pensaba que tales complicaciones no se debían a la lengua en sí, sino

Paul Ibbotson es profesor de desarrollo del lenguaje en la Universidad Abierta de Inglaterra.

Michael Tomasello es codirector del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva de Leipzig y autor de *A natural history of human morality* (Harvard University Press, 2016).

más bien a una limitación de la memoria humana. Chomsky postuló que era la recursividad lo que distinguía el lenguaje de otros procesos mentales, como la categorización o la capacidad para discernir relaciones entre cosas. Hace poco, propuso que dicha facultad habría surgido de una única mutación genética ocurrida hace entre 100.000 y 50.000 años.

Pero, tal y como había sucedido antes, en cuanto los lingüistas se pusieron a examinar la variedad de idiomas existentes en el mundo, encontraron contraejemplos a la afirmación de que este tipo de recursividad constituía una propiedad esencial del lenguaje. Algunas lenguas, como el pirahã del Amazonas, parecen arreglárselas sin la recursividad chomskiana.

Al igual que todas las teorías lingüísticas, la gramática universal de Chomsky trata de conseguir un equilibrio. Por un lado, la teoría ha de ser lo suficientemente simple como para que merezca la pena acogerse a ella; es decir, debe predecir algunos aspectos que no estén en la teoría misma (de lo contrario, no sería más que una lista de hechos). Pero, al mismo tiempo, no puede ser tan simple que no dé cuenta de cosas que sí debería explicar. Consideremos la idea de que todas las frases en todas las lenguas han de tener un sujeto. El problema radica en que el concepto de sujeto se aproxima más a un «aire familiar» de características que a una categoría precisa. Las propiedades de un sujeto quedan definidas por unos 30 rasgos gramaticales. Cada idioma tendrá solo una parte de ellos, y estos no coincidirán con los de otras lenguas.

Chomsky trató de definir la caja básica de herramientas: los engranajes mentales que permiten la existencia del lenguaje. Cuando se han encontrado contraejemplos, sus defensores han argumentado que, solo porque un idioma carezca de una herramienta concreta, como la recursividad, no cabe concluir que esta no forme parte de ese conjunto básico de utensilios. Sería como descubrir que una cultura no conoce la sal y, solo por eso, afirmar que el sabor salado no se encuentra en el repertorio básico de gustos. Por desgracia, esta manera de razonar hace que sea muy difícil poner a prueba las teorías de Chomsky, llegando en ocasiones a bordear el terreno de la falsabilidad.

SENTENCIA DE MUERTE

Uno de los errores clave de las teorías de Chomsky se hace patente al aplicarlas al proceso de adquisición del lenguaje, ya que estipulan que los niños disponen desde el principio de una serie de reglas abstractas que les permiten formar frases (si bien las reglas concretas dependen de qué versión de la teoría estemos usando). No obstante, numerosas investigaciones revelan que el desarrollo del lenguaje no opera así. Más bien, los niños comienzan aprendiendo unos patrones gramaticales simples y, después, van intuyendo poco a poco las reglas que hay detrás.

Al principio los niños solo emplean construcciones concretas, simples y basadas en esquemas específicos de palabras: *¿Dónde está X?*, *Quiero X*, *Más X*, *Es un X*, *Pon X aquí*, *Vamos a X*, *Tira X*, *X se fue*, *Papá X*, *Siéntate en X*, *Abre X*, *X aquí*, *Hay un X*, *X roto*. Más tarde, combinan esas construcciones para formar otras más complejas, como *¿Dónde está el X que mamá ha X-ado?*

Numerosos defensores de la gramática universal aceptan esta caracterización del desarrollo inicial del niño. Pero sostienen que, una vez que comienzan a emerger esas construcciones más complejas, el nuevo estadio refleja la maduración de una facul-

LUCY READING-IKKANDA

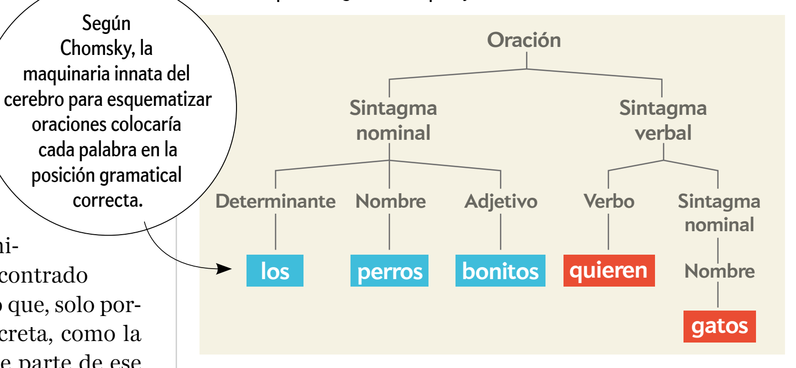
TEORÍAS DEL LENGUAJE

Noamenclatura

Hace 50 años, Noam Chomsky conquistó a la comunidad lingüística con una idea simple: nuestro cerebro viene equipado con una serie de reglas innatas que permiten a los niños formar frases gramaticalmente correctas desde muy temprana edad. Sin esa «gramática universal», un niño nunca llegaría a hablar una lengua. Chomsky se propuso definir tales reglas y averiguar cómo funcionaban. Con el tiempo, sus postulados han sido cuestionados por otras teorías. Estas proponen que los niños adquieren el lenguaje gracias a su capacidad para discernir las regularidades del idioma al que se ven expuestos desde pequeños.

La gramática universal de Chomsky

Según esta idea, los niños poseen una serie de reglas innatas que operan al nivel de frases y que permiten transformarlas. La teoría ha evolucionado a lo largo de los años, pero sigue manteniendo la idea esencial de que nacemos con una facultad que nos permite situar las palabras conforme nos dicta una plantilla gramatical prefijada.



Adquisición basada en el uso

Nuevos puntos de vista sugieren que la capacidad natural de los niños para intuir lo que piensan los demás, combinada con los potentes mecanismos de aprendizaje del cerebro en desarrollo, hacen menos necesaria la noción de una gramática universal. La exposición temprana a una lengua haría que el niño fuese capaz de discernir pautas de uso y aplicarlas después a otras frases. Por ejemplo, la palabra *comida* puede reemplazar a *la pelota* después de *El perro quiere*. Varios estudios han mostrado que tales procesos pueden explicar el modo en que los niños de dos y tres años desarrollan el lenguaje.



tad cognitiva que utiliza la gramática universal, sus categorías y sus principios abstractos.

Por ejemplo, la mayoría de los enfoques que se apoyan en la gramática universal postulan que, cuando un niño formula una pregunta, lo hace siguiendo una serie de reglas basadas en categorías gramaticales como sujeto, verbo y objeto: *¿Qué (O) haces (V) tú (S)?* Si esta hipótesis fuese correcta, los niños deberían cometer errores similares en todas las preguntas que comparten una misma estructura. No obstante, esta predicción no se ve confirmada por las observaciones. En idiomas como el inglés, es frecuente que los niños construyan preguntas gramaticalmente erróneas con ciertas partículas interrogativas (*Why he can't come?*, en lugar de *Why can't he come?*), pero que, al mismo tiempo, produzcan expresiones correctas con otras (*What does he want?*). Los estudios empíricos confirman que las construcciones adecuadas suelen darse con determinadas combinaciones de partículas interrogativas y verbos auxiliares, mientras que otras (por lo general menos frecuentes) siguen empleándose de manera incorrecta. [Varios estudios han señalado que tales irregularidades apenas parecen producirse en las lenguas romances.]

Los defensores del punto de vista chomskiano argumentan que los niños sí poseen una competencia gramatical, pero que su rendimiento se ve mermado por ciertos factores, los cuales ocultarían la verdadera naturaleza de su gramática y, además, se interpondrían en el estudio de la gramática «pura» postulada por Chomsky. Entre tales obstáculos se incluirían una memoria, una atención y unas facultades sociales inmaduras.

Sin embargo, la interpretación chomskiana no es la única posible. Puede que, en lugar de enmascarar el verdadero estatus de la gramática infantil, la memoria, la atención y las facultades sociales constituyan partes integrales del desarrollo del lenguaje. Un estudio reciente en el que participó uno de nosotros (Ibbotson) mostró que la facultad de los niños para conjugar adecuadamente el pasado de un verbo irregular (*Ayer puse*, en lugar de *Ayer poní*) parece estar asociada a una capacidad, completamente ajena a la gramática, de inhibir respuestas tentadoras pero incorrectas; por ejemplo, pronunciar la palabra *luna* cuando se está observando una imagen del sol. En vez de entorpecer la expresión de la gramática pura de Chomsky, tal vez la memoria, las analogías mentales, la atención y la capacidad para razonar sobre situaciones sociales permitan explicar por qué los niños adquieren el lenguaje de la manera en que lo hacen.

Tal y como sucedió con los cambios para acomodar los datos procedentes de distintas lenguas y con el argumento de la caja de herramientas, la idea de que el rendimiento del niño enmascara sus competencias gramaticales resulta prácticamente irrefutable. Este tipo de repliegues son comunes a todos los paradigmas explicativos en situación de declive y faltos de una base empírica sólida. Pensemos, por ejemplo, en el psicoanálisis freudiano o en las interpretaciones marxistas de la historia.

Pero, aparte de estas dificultades empíricas, los psicolingüistas que trabajan con niños tienen dificultades para concebir un proceso teórico en el que todos los bebés comienzan con el mismo conjunto de reglas gramaticales «algebraicas» y, más tarde, se las arreglan para descifrar la manera en que una lengua concreta (ya sea el inglés o el suajili) conecta con dicho esquema de reglas. Este rompecabezas se conoce como «problema del enlace» (*linking problem*). Un intento de resolverlo en el contexto de la gramática universal fue el concebido por el psicólogo de Harvard Steven Pinker para el sujeto de las oraciones. Sin embargo, su explicación resultó no concordar con los datos de los estudios sobre el desarrollo infantil, y tampoco parece poder aplicarse a categorías gramaticales distintas del sujeto. Así pues, el problema del enlace —el cual debería constituir el reto central a la hora de aplicar la gramática universal a la adquisición del lenguaje— nunca ha sido resuelto o siquiera puesto a prueba con seriedad.

UNA VISIÓN ALTERNATIVA

Todo lo anterior hace inevitable concluir que la noción de gramática universal solo puede ser errónea. Pero, aun cuando los datos hablen en contra, los científicos son reacios a abandonar su teoría favorita si no cuentan con una alternativa razonable. Dicha alternativa acaba de llegar. Conocida como «lingüística basada en el uso», esta teoría, que toma diferentes formas, sostiene que la estructura gramatical no es innata. En su lugar, la gramática aparecería como un producto de la historia (los procesos que determinan la manera en que las lenguas se transmiten de una generación a otra) y de la psicología humana (el repertorio de facultades sociales y cognitivas que hacen posible que las distintas generaciones adquieran la lengua). Pero, más importante aún, esta teoría propone que el lenguaje emplea recursos cerebrales que no evolucionaron específicamente para cumplir esa función. En este sentido, contrasta con la idea de Chomsky de una mutación genética única que dio lugar a la recursividad.

Según el enfoque basado en el uso, el cual incluye ideas de la lingüística funcional, la lingüística cognitiva y la gramática de construcción, los niños no nacen con una herramienta universal y específica para adquirir la gramática, sino que heredan el equivalente mental de una navaja suiza: un conjunto de herramientas genéricas (como la capacidad de categorizar, leer las intenciones comunicativas y hacer analogías) mediante las cuales construyen las categorías y las reglas gramaticales a partir del idioma que oyen en su entorno.

Por ejemplo, un niño puede entender la frase *El gato se comió al conejo*. Y, por analogía, también comprenderá *La cabra acarició al hada*. A partir de un caso generalizan hacia otro. Después de oír suficientes ejemplos de este tipo, serán incluso capaces de adivinar quién le hizo qué a quién en la frase *El gazero mibeló a la tuma*, aunque los sustantivos y el verbo carezcan de sentido. La gramática tiene que ser algo discernible más allá de las palabras, ya que las distintas oraciones comparten muy poco en lo que se refiere a los vocablos que incorporan.

En el lenguaje, el significado emerge a partir de la interacción entre los posibles sentidos de las palabras mismas (las distintas cosas que puede significar el verbo *comer*, por ejemplo) y el de la construcción gramatical que las conecta. Así, aunque *estornudar* esté definido en el diccionario como un verbo intransitivo (uno que solo requiere un actor; en este caso, la persona que estornuda), podemos forzar su uso con complemento directo e indirecto. El resultado podría ser algo así como *María le estornudó el pañuelo a Pedro*. Aquí el verbo cobra un matiz de transferencia ajeno a su significado original: uno que nos dice que, de alguna manera, María hizo el pañuelo saliese despedido hacia Pedro. El ejemplo muestra que la estructura gramatical puede contribuir al significado tanto como las palabras mismas. Esta noción contrasta con la teoría de Chomsky, que postula que existen niveles de gramática completamente libres de significado.

La noción de la navaja suiza explica la adquisición del lenguaje sin necesidad de recurrir a dos fenómenos requeridos por la gramática universal. El primero es la existencia una serie de reglas algebraicas para combinar símbolos: una «gramática nuclear» preprogramada en el cerebro. El segundo es un léxico: una lista de excepciones que cubre todos los modismos e idiosincrasias de las lenguas naturales y que hay que aprender.

El problema con esta idea es que existen construcciones que parcialmente están basadas en reglas y parcialmente no, como *Y tú... ¿qué te parece?*, en la que el complemento indirecto toma la forma de un sujeto (*tú*, en lugar de *a ti*). Los hablantes generan de manera natural un gran número de expresiones similares (*¡¿Él, un médico?!*). Por tanto, la pregunta es si tales producciones forman parte de la gramática nuclear o si, por el contrario, pertenecen a la lista de excepciones. Si no emanan de la gramática nuclear, entonces deberían ser aprendidas de una en una. Pero, si los niños son capaces de usar estas expresiones parcialmente basadas en reglas y parcialmente no, ¿por qué no iban a poder adquirir el resto de la misma forma? Dicho de otro modo: ¿para qué necesitarían entonces la gramática universal?

La idea de gramática universal contradice las pruebas que indican que los niños adquieren el lenguaje por medio de la interacción social y que ganan práctica usando construcciones que han sido creadas por una comunidad lingüística a lo largo del tiempo. En algunos casos tenemos buenos datos sobre cómo se da este proceso. Por ejemplo, las oraciones de relativo son bastante comunes en la mayoría de los idiomas, y a menudo derivan de un engranaje de frases separadas. Podríamos decir *Mi hermano; vive en Arkansas; toca el piano*. Pero, debido a varios mecanismos cognitivos (como la esquematización, la habituación, la descontextualización y la automatización), estas expresiones han ido evolucionando hacia otras más complejas, como *Mi hermano, que vive en Arkansas, toca el piano*.

Más aún, nuestra especie dispone de una capacidad única para descifrar las intenciones comunicativas de los demás: lo que un hablante está tratando de expresar aunque no lo haga de la manera correcta. Por ejemplo, podemos decir *María donó/mandó/vendió algunos libros a la biblioteca*, pero no *María contribuyó algunos libros a la biblioteca*. Algunos estudios recientes han demostrado que hay varios mecanismos que hacen que el niño evite este tipo de analogías erróneas. Por ejemplo, los niños nunca emplean analogías carentes de sentido, como *María comió algunos libros a la biblioteca*. Además, si oyen con frecuencia oraciones como *María contribuyó con algunos libros*, eso evitará que acaben diciendo *María contribuyó algunos libros*.

Tales mecanismos de restricción reducen enormemente el abanico de analogías que podría hacer un niño y logran que estas se circunscriban a las intenciones comunicativas de su interlocutor. Todos usamos esa lectura de intenciones cuando, al oír una frase como *¿Puedes abrir la puerta?*, entendemos que se trata de una solicitud de ayuda y no de una pregunta sobre nuestra destreza a la hora de abrir puertas.

En su teoría, Chomsky sí dejó lugar a la pragmática (el uso de la lengua en función del contexto). Dado lo ambiguo que puede llegar a ser el lenguaje, se vio forzado a hacerlo. Pero pareció otorgarle un papel secundario en comparación con el de la gramática. En cierto sentido, el enfoque basado en el uso ha dado la vuelta al debate, orientándolo hacia la cuestión de cuánto puede hacer la pragmática por el lenguaje antes de que los hablantes tengan que recurrir a las reglas de la sintaxis.

Con todo, la lingüística basada en el uso aún está lejos de ofrecer una explicación completa del funcionamiento del lenguaje. El modo en que los niños hacen generalizaciones con significado a partir de las frases que oyen en su entorno no basta para dar cuenta de la manera en que construyen oraciones. Por ejemplo, hay generalizaciones con sentido que no son gramaticales, como *Pedro desapareció el conejo*. Sin embargo, de entre todas las posibles generalizaciones con significado pero agramaticales que podría hacer un niño, son muy pocas las que se producen.

Los niños parecen ser sensibles al hecho de que su comunidad lingüística se atiene a unas normas y que solo comunica una idea dada de ciertas maneras. Consiguen un delicado equilibro, ya que el lenguaje infantil es al mismo tiempo creativo (*He abrido la puerta*) y respetuoso con las reglas gramaticales (*He abierto la puerta*). A la lingüística basada en el uso aún le queda un largo camino por recorrer para explicar con exactitud el modo en que estas fuerzas dan lugar al desarrollo del lenguaje.

UNA MIRADA HACIA DELANTE

En su momento, el paradigma chomskiano supuso una ruptura radical con respecto a los tratamientos más informales que imperaban en la época y dirigió la atención hacia las complejidades cognitivas que intervienen en el desarrollo del lenguaje. Sin embargo, aunque sus teorías nos hicieron ver varios aspectos de dicho proceso, también nos cegaron ante otros. Hoy, tanto en lingüística como en otras disciplinas, numerosos investigadores se sienten cada vez más insatisfechos con esa manera exclusivamente formal de enfocar el lenguaje, por no hablar de los problemas empíricos de la teoría. Además, muchos reniegan de los análisis teóricos de butaca cuando hay una gran cantidad de corpus lingüísticos, buena parte de ellos disponibles en línea, a los que es posible recurrir para poner a prueba una teoría.

El cambio de paradigma aún no se ha completado, pero para muchos expertos estas ideas han supuesto una bocanada de aire fresco en lingüística. Aún quedan apasionantes descubrimientos por hacer sobre las distintas lenguas del mundo, sus parecidos y diferencias, los cambios que han experimentado a lo largo de la historia y la manera en que los niños adquieren su competencia lingüística en una o varias de ellas.

La gramática universal parece haber llegado a su último callejón sin salida. En su lugar, la lingüística basada en el uso promete un nuevo camino en la investigación empírica sobre la adquisición, el uso y la evolución histórica de las 6000 lenguas que se hablan en el planeta. IyC

PARA SABER MÁS

Constructing a language: A usage-based theory of language acquisition. Michael Tomasello. Harvard University Press, 2003.

Constructions at work: The nature of generalization in language. Adela Goldbert. Oxford University Press, 2006.

Language, usage and cognition. Joan Bybee. Cambridge University Press, 2010.

EN NUESTRO ARCHIVO

Lenguaje, redes y evolución. Ricard Solé, Bernat Corominas Murtra y Jordi Fortuny en *IyC*, mayo de 2013.

La pequeña gran diferencia. Gary Stix en *IyC*, noviembre de 2014.

Cómo adquieren los bebés el lenguaje. Patricia K. Kuhl en *IyC*, enero de 2016.





EVOLUCIÓN

LA especiación DE LA orca común

El cetáceo parece estar diferenciándose en varias especies, quizás a causa de las desigualdades culturales que están distanciando a sus poblaciones

Rüdiger Riesch

Rüdiger Riesch es profesor de biología evolutiva en la escuela Royal Holloway de la Universidad de Londres. Su interés se centra en los mecanismos que crean, mantienen y limitan la biodiversidad, con énfasis en la especiación que se produce a causa del aprovechamiento de un nuevo nicho ecológico por parte de una población.



A escasas brazas de las playas pedregosas de Bere Point en la isla de Malcolm, en la Columbia Británica, el *Naiad Explorer* se mecía suavemente al vaivén de las aguas del estrecho de la Reina Carlota. El sol había levantado ya la bruma matinal, salvo un fino velo que se aferraba a las copas de los abetos, píceas y tuyas de la isla. Desde la embarcación pude contemplar cómo tres orcas hermanas, apodadas Cracroft, Plumper y Kaikash, restregaban su cuerpo contra el fondo de guijarros en unos bajíos situados a proa. Después de casi una hora entretenidas en esa actividad, no tardaron en marchar en busca de salmones o de una pareja.

No sabemos con certeza el motivo de tal hábito; la mayoría de los entendidos opina que se sirven de él para arrancar la piel muerta y deshacerse de los parásitos externos, pero no descartan el mero placer. Sea cual sea la razón, esa conducta rara vez observada en otros cetáceos (el orden que incluye las ballenas, delfines y marsopas) es cosa cotidiana aquí. Forma parte del acervo cultural distintivo de las orcas residentes en estas aguas septentrionales, que hacen del norte de la isla de Vancouver su hogar estival.

Las orcas residentes en dichas aguas no son las únicas que hacen gala de conductas singulares. Numerosas observaciones realizadas desde los años setenta del siglo pasado han demostrado que otras poblaciones dispersas por el globo poseen modos singulares de actuar en comportamientos que van desde la caza hasta la comunicación. Los rasgos físicos, como la coloración, la talla corporal y la morfología de la aleta dorsal, también varían entre los grupos de orcas, si bien no de forma tan acusada. Tales diferencias culturales y físicas, junto con la asombrosa diversidad genética documentada en la última quincena de años, nos inducen a pensar a mí y a otros muchos investigadores que la orca común no encarna una única especie, como los biólogos pensábamos desde hace decenios, sino que se halla inmersa en un proceso de divergencia evolutiva. De seguir su curso, esta dará lugar presumiblemente a diversas especies que no podrán engendrar descendencia viable o fértil si se cruzan entre sí.

Curiosamente, las diferencias culturales podrían ser el factor determinante de esa diversificación: las orcas parecen estar apareándose con individuos que comparten sus mismas costumbres y no con otros extraños, preferencia que crea las condiciones propicias para la especiación. De ser así, constituirían un ejemplo sobresaliente de un mecanismo de especiación que la teoría clásica sobre la creación de las especies nuevas no contempla. También podrían brindar una nueva visión sobre cómo otro grupo de mamíferos, *Homo sapiens* y sus ancestros extintos, se diversificaron en el abanico de especies que en el pasado compartieron el planeta.

LA DIVERSIDAD DE LA ORCA

Desde hace más de un siglo, la biología ha buscado en la geografía la explicación de la especiación. En el escenario predilecto, el de la especiación alopátrida, dos poblaciones de una especie ancestral quedan físicamente separadas, en general por una barrera geográfica de algún tipo (una cordillera, un desierto o un gran río) que las aísla reproductivamente. Si la separación perdura lo suficiente, con el tiempo cada una seguirá su propia senda evolutiva y adquirirá genes diferentes que les ayudarán a sobrevivir en condiciones ambientales dispares o que podrán acumularse por azar a través del proceso de la deriva genética. La teoría afirma que, a la larga, ambas poblaciones serán tan distintas desde un punto de vista genético que, si vuelven a entrar en contacto, no conseguirán engendrar descendencia.

Las pruebas contundentes brindadas por numerosos animales, desde las quisquillas de pinzas del género *Alpheus* que viven en ambas orillas del istmo de Panamá hasta las especies de cachorritos (*Cyprinodon*) endémicas de manantiales dispersos por California y Nevada, demuestran que, en efecto, el aislamiento

EN SÍNTESIS

Los biólogos evolutivos han recurrido tradicionalmente a la geografía para explicar el surgimiento de las especies nuevas.

Según la explicación clásica, cuando dos poblaciones de una especie ancestral quedan separadas por una barrera geográfica que impide todo contacto reproductivo, cada una emprende su propio camino evolutivo.

Las poblaciones de orcas parecen estar siguiendo sendas divergentes pese a la ausencia de barreras geográficas que las separen.

Cada vez hay más indicios de que las diferencias culturales vinculadas con la adquisición del alimento son las responsables de ese proceso. Los hallazgos en la orca común suscitan preguntas acerca de la diversificación en otro grupo de seres vivos provistos de cultura: los miembros de la familia humana.

PÁGINAS ANTERIORES: PAUL NICKLEN, GETTY IMAGES

geográfico facilita el proceso de especiación. Pero en ocasiones en una misma zona geográfica surgen dos o más poblaciones de aspecto dispar que acaban deviniendo sendas especies. Los estudiosos del tema, entre los que destaca el biólogo evolutivo alemán Ernst Mayr, han sostenido tradicionalmente que la especiación requiere como elemento primordial cierto período de aislamiento y que, por tanto, resulta imposible, o cuanto menos extraordinaria, dentro de una misma zona geográfica. Sin embargo, trabajos más recientes han demostrado que no siempre se necesita un aislamiento geográfico, en el sentido habitual, para que la especiación tenga lugar.

Hoy la mayoría de los biólogos conviene en que ciertas especies, entre ellas los variadísimos cíclidos de los lagos de origen tectónico y volcánico de África Oriental y Nicaragua, así como las palmeras kentia (*Howea*) que crecen en la isla de Lord Howe en el Pacífico, han evolucionado sin ese aislamiento. En el lenguaje de la biología, se dice que han sufrido un proceso de especiación simpátrida. En los cíclidos, esta se produjo a raíz de la adaptación de cada uno de ellos al aprovechamiento de una fuente de alimento distinta (pero sin la influencia de la cultura), mientras que en las palmeras de Lord Howe surgieron diferencias en el momento de la floración. Los ejemplos confirmados de especiación simpátrida no abundan en los mamíferos, de ahí que el caso de la orca revista tanto interés.

La orca común es el mamífero con la distribución más amplia del planeta, solo superada por nuestra especie. Habita en los siete mares y puede recorrer más de cien kilómetros diarios o salvar distancias de miles en pocas semanas. No se conocen barreras geográficas que impidan el contacto entre los individuos de poblaciones aledañas. Pero ahora se ha demostrado que en varias regiones marinas conviven sin confraternizar varias formas ecológicamente distintas, o ecotipos. De este modo, cierto tipo se alimenta sobre todo de una especie de pez, en tanto que otro prefiere cazar focas.

El mejor estudiado de los ecotipos de la orca habita en el Pacífico nororiental. Los trabajos emprendidos allí a inicios de los años setenta por el canadiense Michael Bigg dieron lugar a numerosos hallazgos notables. En primer lugar, el investigador descubrió que era posible reconocer a cada individuo por la forma y el tamaño de su aleta dorsal, así como por la forma, el tamaño y la coloración de la llamada «silla de montar», la franja albogrisácea situada bajo dicha aleta. Esos rasgos permiten a los biólogos identificar a cada individuo, a semejanza del estudio de la fisonomía facial y de las huellas dactilares propio de la medicina forense. En segundo lugar, Bigg y sus colaboradores, entre ellos John K. B. Ford y Graeme M. Ellis, ambos del Departamento de Pesca y Océanos de Canadá, y Kenneth C. Balcomb III, del Centro de Investigaciones Balleneras del estado de Washington, hallaron que en las aguas de la costa occidental de Estados Unidos y Canadá cohabitan tres ecotipos de orca: residentes, transeúntes y de mar abierto. Las residentes son eminentemente piscívoras, con los salmones como alimento predilecto; las nómadas o transeúntes persiguen a otros mamíferos acuáticos y alguna que otra ave marina; las de aguas abiertas, por último, parecen seguir una segunda dieta piscívora, que incluye el fletán del Pacífico y el tollo negro dormilón (una especie de escualo), pero sus hábitos son poco conocidos a causa de los escasos encuentros que se realizan de ellas.

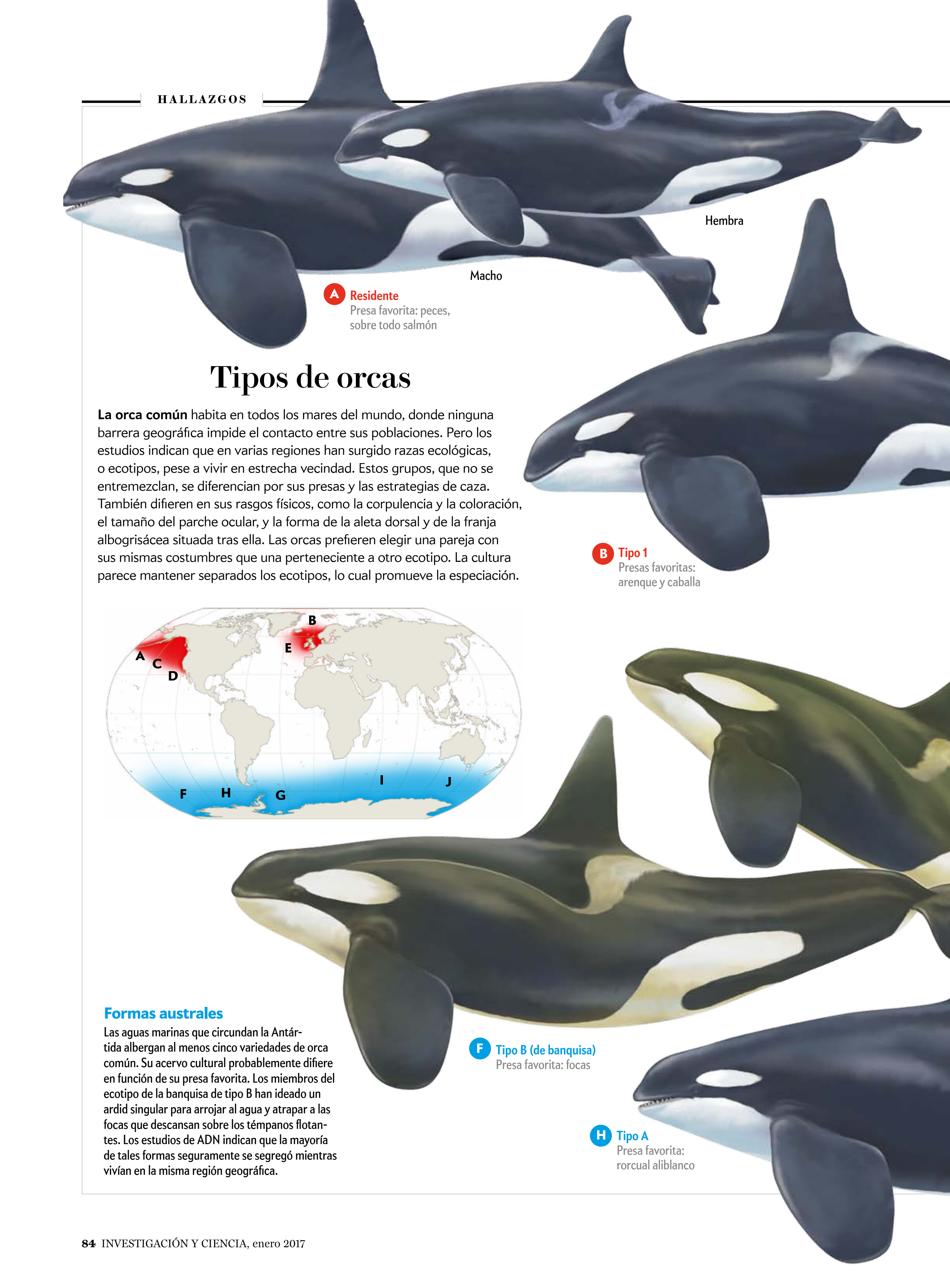
En los últimos años, las investigaciones encabezadas por Olga A. Filatova, de La Universidad estatal de Moscú, Alexander M. Burdin, de la Academia Rusa de Ciencias, y Erich Hoyt, de la Sociedad para la Conservación de Ballenas y Delfines, en Inglaterra, han revelado que en las aguas del Pacífico noroccidental que rodean la península de Kamchatka también conviven ecotipos residentes y transeúntes. Ahora sabemos que hay allí una franja más o menos continua de poblaciones residentes que coexisten con otras transeúntes, las cuales se desplazan entre las orillas noreste y noroeste del Pacífico a través de las islas Aleutianas.

Al otro lado del globo, las orcas de Islandia, las islas Shetland y Noruega, en el noreste del Atlántico, muestran sus propias preferencias alimentarias. Científicos como Volker B. Deecke, de la Universidad de Cumbria, Andrew D. Foote, de la Universidad de Berna, y sus colaboradores, han descrito dos grupos: poblaciones de tipo 1 que persiguen peces, sobre todo arenques y caballas, y de tipo 2, que acechan a las focas. Se precisan más estudios para conocer plenamente las diferencias entre sus dietas.

El hemisferio austral también acoge ecotipos de la especie que se solapan geográficamente. John W. Durban y Robert L. Pitman, de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano, y sus colaboradores han descubierto como mínimo cuatro en aguas antárticas y subantárticas. Las orcas de tipo A parecen estar especializadas en la caza del rorcual aliblanco antártico; las de tipo B, por su parte, se dividen en una forma corpulenta (la llamada orca de la banquisa), que depreda sobre todo focas, y otra menuda (la orca del estrecho de Gerlache), que se inclina por los pájaros bobos. El tipo C, la orca más pequeña conocida, pesca el llamado bacalao antártico (*Dissostichus mawsoni*). Por último, el tipo D, como las orcas de aguas abiertas del Pacífico Norte, es al parecer un ecotipo de mar abierto apenas estudiado. Se sabe que arrebata a los palangreros ejemplares del bacalao de profundidad (*D. eleginoides*, afín al anterior), pero seguramente devora también otras presas.

Las orcas parecen aparearse con otras que comparten sus mismas costumbres, lo que crea las condiciones propicias para la especiación

Una vez que los científicos se percataron de que las orcas se dividían en todas esas facciones, comenzaron a preguntarse por su origen. ¿Cohabitaban en la misma región geográfica cuando dio comienzo la diferenciación, o empezaron a divergir en algún momento en que vivían separadas y colonizaron después la misma región cuando ya habían tomado sendas evolutivas separadas? Los datos relativos a la mayoría de las orcas boreales no permiten extraer conclusiones fiables. Mientras que varios estudios de Foote y sus colaboradores apuntan a que la divergencia en el Pacífico Norte ocurrió mientras las poblaciones permanecían geográficamente aisladas (especiación alopátrida), otros análisis de Alan Rus Hoelzel, de la Universidad de Durham, y sus colaboradores apuntan a que esos ecotipos podrían haber coexistido siempre (especiación simpátrida). En cambio, en las orcas del océano Antártico, las pruebas son claras: la mayoría de esos ecotipos, si no todos, debieron de divergir simpátridamente mientras poblaban la misma región.

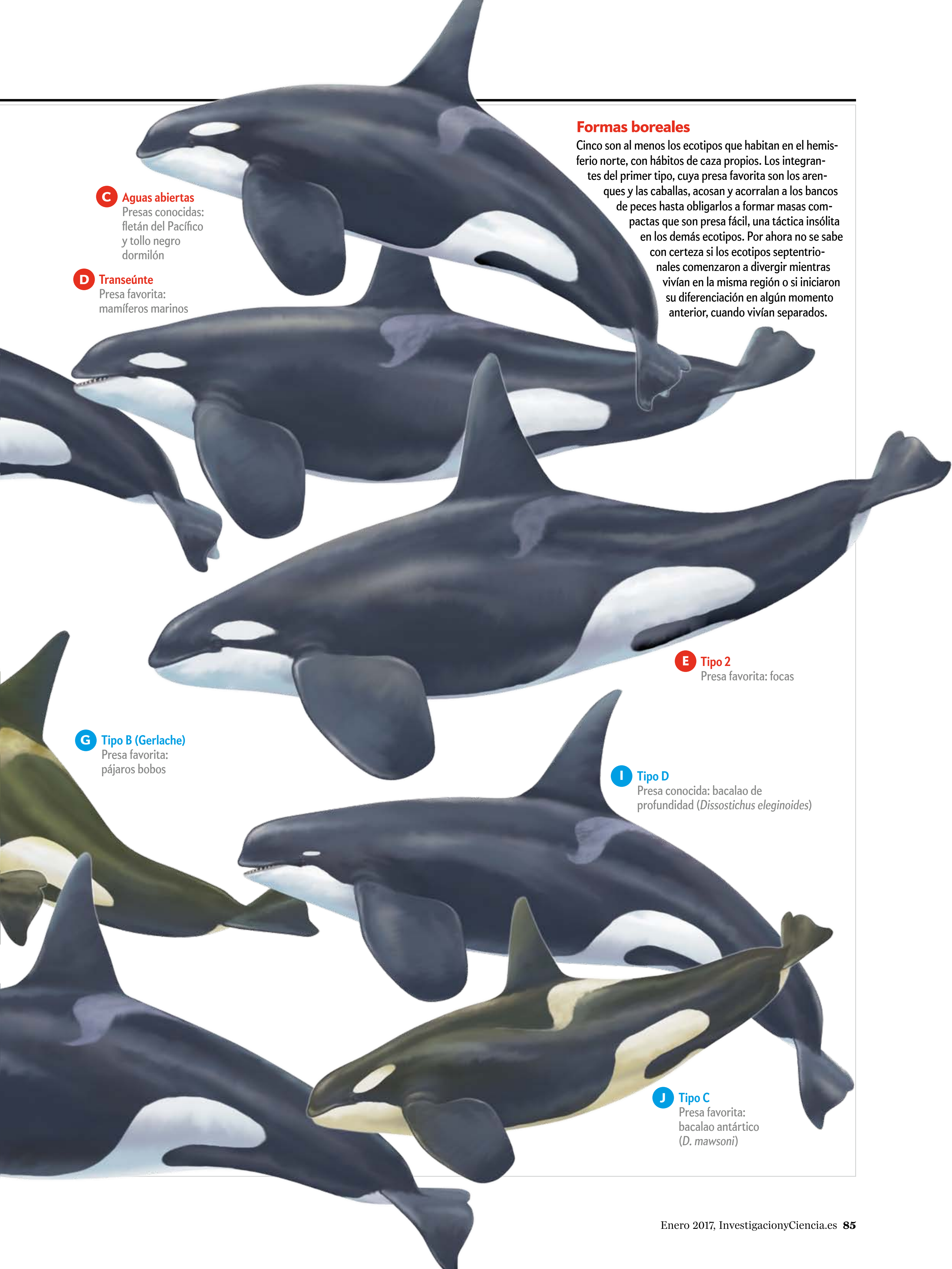


Tipos de orcas

La orca común habita en todos los mares del mundo, donde ninguna barrera geográfica impide el contacto entre sus poblaciones. Pero los estudios indican que en varias regiones han surgido razas ecológicas, o ecotipos, pese a vivir en estrecha vecindad. Estos grupos, que no se entremezclan, se diferencian por sus presas y las estrategias de caza. También difieren en sus rasgos físicos, como la corpulencia y la coloración, el tamaño del parche ocular, y la forma de la aleta dorsal y de la franja albogrisácea situada tras ella. Las orcas prefieren elegir una pareja con sus mismas costumbres que una perteneciente a otro ecotipo. La cultura parece mantener separados los ecotipos, lo cual promueve la especiación.

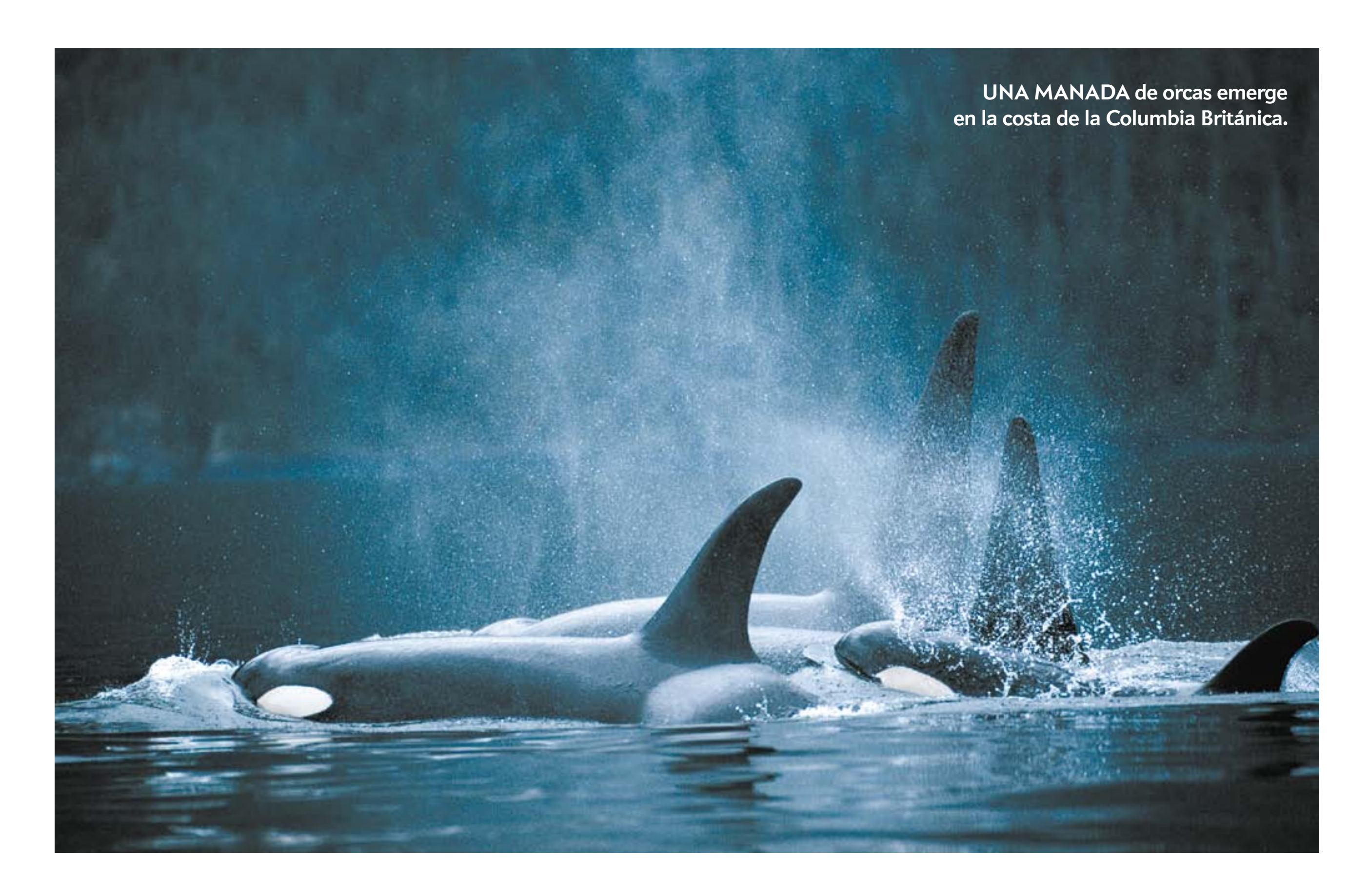
Formas australes

Las aguas marinas que circundan la Antártida albergan al menos cinco variedades de orca común. Su acervo cultural probablemente difiere en función de su presa favorita. Los miembros del ecotipo de la banquisa de tipo B han ideado un ardid singular para arrojar al agua y atrapar a las focas que descansan sobre los témpanos flotantes. Los estudios de ADN indican que la mayoría de tales formas seguramente se segregó mientras vivían en la misma región geográfica.



Formas boreales

Cinco son al menos los ecotipos que habitan en el hemisferio norte, con hábitos de caza propios. Los integrantes del primer tipo, cuya presa favorita son los arenques y las caballas, acosan y acorralan a los bancos de peces hasta obligarlos a formar masas compactas que son presa fácil, una táctica insólita en los demás ecotipos. Por ahora no se sabe con certeza si los ecotipos septentrionales comenzaron a divergir mientras vivían en la misma región o si iniciaron su diferenciación en algún momento anterior, cuando vivían separados.



UNA MANADA de orcas emerge en la costa de la Columbia Británica.

Con todo, una vez que los ecotipos simpátridos comenzaron a diferenciarse, lo hicieron con rapidez. En mayo del año pasado, Foote y sus colaboradores describieron los resultados de su análisis genómico en cinco ecotipos del Pacífico Norte y el Antártico. Llegaron a la conclusión de que esas formas habían evolucionado a partir de un ancestro común en los pasados 250.000 años. ¿Qué las mantiene separadas ahora? Los registros genealógicos que publica de modo esporádico SeaWorld, que acoge orcas capturadas en las aguas septentrionales del Atlántico y del Pacífico, demuestran que el apareamiento entre ecotipos distintos engendra descendencia viable y fértil, a diferencia de los mulos y burdéganos nacidos de la hibridación entre caballos y asnos. Por tanto, resulta muy improbable que las incompatibilidades genéticas entre los ecotipos de orca estén impidiendo el mestizaje de las poblaciones naturales. Cada vez son más los indicios que apuntan a las diferencias culturales como las responsables.

CHOQUE DE CULTURAS

Como tantos otros seres vivos que han experimentado un proceso de especiación, las orcas se están diversificando al explotar fuentes alimentarias distintas y desarrollar rasgos que presumiblemente les ayudan a procurarse ese sustento. Algunos de esos caracteres distintivos son físicos, como la mayor corpulencia que suelen mostrar las que cazan a otros mamíferos marinos. Pero la especialización más drástica ha tenido lugar en los comportamientos culturales vinculados con la adquisición del alimento. Puesto que estas y otras conductas solo se observan en ciertas poblaciones, donde parecen transmitirse entre los miembros de la misma generación y de una generación a otra a través de la interacción social (aprendizaje social), en lugar de ser innatas, los biólogos las califican de culturales.

Así, ciertas poblaciones de orcas que cazan otros mamíferos han aprendido a embarrancar de forma deliberada para atrapar crías de leones y elefantes marinos que se acercan incautas a la orilla. Este comportamiento ha sido observado en dos grupos que no pertenecen a los ecotipos citados. Uno habita en las aguas del archipiélago de Crozet, al sur del Índico entre África y la Antártida, y el otro cerca de la península de Valdés, en la costa atlántica de Argentina. Ambos parecen haber ideado esa arriesgada estratagema por separado, en virtud de la naturaleza de su presa favorita y de las características físicas de sus terrenos de caza. En estos abundan los brazos de mar y las desembocaduras fluviales de aguas profundas que permiten a las orcas permanecer sumergidas hasta escasos metros de la orilla, donde descansan sus presas.

En la Antártida, la robusta orca de tipo B o de banquisa ha concebido otra artimaña ingeniosa para atrapar focas: crear olas a coletazos. Las focas suelen reposar sobre pequeños témpanos flotantes, donde se sienten a salvo de los peligros que esconde el mar. Pero las orcas autóctonas han aprendido a levantar olas que barren los témpanos y arrastran a las ocupantes hasta el agua, donde se convierten en una presa fácil.

Por su parte, las orcas piscívoras de tipo 1 que circundan Islandia y Noruega han urdido una estrategia diametralmente opuesta, bautizada como pesca en carrusel, para atrapar los arenques, la base de su alimentación. La manada acorrala a los bancos de peces cerca de la superficie del agua para que no puedan huir hacia las profundidades. A continuación, algunos miembros del grupo nadan derechos hacia la aglomeración propinando coletazos para aturdir y matar a los arenques.

Las orcas hasta se comunican de forma distinta según la naturaleza de su sustento. Y es en la comunicación acústica donde más se hace patente su asombrosa diversidad cultural.

PÁGINAS ANTERIORES: ILUSTRACIÓN DE AMADEO BACHAR; EN ESTA PÁGINA: HIROYA MINAKUCHI, *NATIONAL GEOGRAPHIC CREATIVE*

Como otros delfínidos, usan tres señales acústicas: los clics de ecolocalización para navegar y localizar a las presas, las ráfagas (o llamadas) de impulsos y los silbidos, estos dos últimos para comunicarse con sus iguales. Las ráfagas y los silbidos no solo difieren entre las orcas de regiones distintas, sino que también lo hacen en las que vagan por la misma región.

El origen de esa variación intrarregional en la emisión y el uso de las señales queda claro cuando uno repara en los imperativos que afronta cada ecotipo. Las orcas que cazan otros mamíferos marinos han de vérselas con la soberbia capacidad auditiva de sus presas bajo el agua: cualquier sonido emitido por el cazador delataría su presencia. Por eso, las orcas transeúntes del noroeste del Pacífico y las que cazan otros mamíferos en el Atlántico Norte recurren muy rara vez a las señales acústicas; casi siempre nadan y cazan en sigilo. Las piscívoras no tienen ese problema, por lo que suelen ser mucho más locuaces y no escatiman en la ecolocalización cuando viajan o andan en busca de presas.

Es más, muchas de esas llamadas de impulsos y, como algunas de mis investigaciones han demostrado, una parte de los silbidos son sumamente estereotipados. Es decir, las señales pueden dividirse en sonidos discretos reconocibles, como las letras del alfabeto. (No hay indicio alguno de que la orca se sirva de esas señales de ningún modo parecido a las palabras y las frases humanas. Más bien es el contexto que acompaña a la señal el que parece dotarla de significado.) Estos sonidos discretos presentan variaciones geográficas y ecotípicas. Pero también suelen diferir entre los grupos sociales que conforman cada ecotipo. Por ejemplo, entre las residentes septentrionales (una población de orcas piscívoras que mora en las aguas situadas entre la mitad norte de la isla de Vancouver y el sureste de Alaska), cada unidad familiar cuenta con un repertorio propio de 7 a 17 llamadas discretas. Las familias de orcas que comparten una parte de sus dialectos se agrupan en clanes acústicos; en el caso de las residentes septentrionales, son los clanes A, G y R.

Los distintos tipos de llamada discreta y de dialectos familiares resultan tan distintivos que los que estudiamos esas poblaciones podemos asignar los individuos a un ecotipo, a un clan (en el caso de las residentes septentrionales) y hasta a una unidad familiar solo escuchando las grabaciones de su repertorio de llamadas discretas. Esas diferencias parecen ser importantes para la elección de la pareja. Los análisis genéticos de las residentes septentrionales efectuados por Lance Barrett-Lennard, del Centro de Ciencias Marinas del Acuario de Vancouver, revelan que la similitud de las llamadas refleja en gran medida el parentesco genético. La mayoría de las parejas se forja entre miembros de clanes distintos, poseedores de llamadas igualmente diferentes. De este hallazgo se deduce que las residentes septentrionales hallan más atractivas a otras residentes de sus latitudes cuyo canto no se asemeje al suyo. Así, los dialectos se convierten en un modo ingenioso de evitar la consanguineidad.

Que esas orcas posean en común tales costumbres ecotípicas y parezcan eludir el contacto social y el apareamiento con extrañas de otros ecotipos pese a la ausencia de barreras de carácter biológico sugiere que la cultura está manteniendo separados a esos ecotipos. Si esa segregación perdura durante el suficiente número de generaciones, los ecotipos seguirán acumulando diferencias en su ADN que acabarán por hacerlas genéticamente incompatibles. La cultura de las orcas podría estar ocupando el lugar del aislamiento geográfico en el proceso de especiación al evitar la mezcla de las poblaciones.

Tales descubrimientos suscitan interesantes incógnitas acerca de la diversificación de la familia humana. Los antropólogos han venido pensando desde hace tiempo que la mayoría de las presiones selectivas que modelaron nuestra evolución fueron el resultado de cambios acaecidos exclusivamente en nuestro ambiente externo. Pero recientes análisis genéticos indican que buena parte de nuestra evolución podría ser consecuencia de ciertas innovaciones culturales, en ocasiones de ámbito muy restringido. La práctica de la ganadería propició la aparición de la tolerancia a la lactosa en ciertas poblaciones de Europa y África; la alimentación rica en grasas de los inuit groenlandeses ha conducido al desarrollo de un metabolismo lipídico más eficiente en esa etnia. Si bien nadie duda hoy de que todas las poblaciones humanas modernas pertenecen a la misma especie y se mezclan habitualmente, durante la mayor parte de la prehistoria varias especies humanas habitaron el planeta. ¿Pudo ser la cultura un factor determinante en la especiación entre aquellos primeros miembros de la familia humana?

CAMINOS DIVERGENTES

A pesar de los notorios avances sobre el proceso de diversificación de la orca, queda mucho por aprender. ¿Albergarán otras regiones menos estudiadas de los océanos otros ecotipos simpátridos de la especie? Algunos estudios preliminares señalan a los mares que bañan África; también se barajan Sudamérica y el sur de Asia. ¿Qué sistemas de comunicación emplean las orcas de las aguas subantárticas y antárticas? ¿Y cómo es su estructura social? Gracias a las modernas herramientas para el estudio del genoma, el porvenir de la investigación de la especiación en general, y la de la orca en particular, se antoja esplendoroso. Quizás en un futuro no muy lejano estas y otras nuevas técnicas permitan determinar de forma inequívoca cuál era la distribución geográfica de las poblaciones de este cetáceo en todas las fases de su diversificación.

Ya sabemos que la cultura puede mantener separadas a las poblaciones vecinas de orcas. Tal vez en pocos años los biólogos reconozcan esos ecotipos como especies, cada una restringida a cierta área geográfica de nuestros mares, provista de su propia alimentación y costumbres sumamente específicas, con el potencial de divergir y crear nuevos brotes en el árbol de la vida. IyC

PARA SABER MÁS

Cultural traditions and the evolution of reproductive isolation: Ecological speciation in killer whales? R. Riesch et al. en *Biological Journal of the Linnean Society*, vol. 106, n.º 1, págs. 1-17, mayo de 2012.
Phylogenomics of the killer whale indicates ecotype divergence in sympatry. A. E. Moura et al. en *Heredity*, vol. 114, n.º 1, págs. 48-55, enero de 2015.
Geographic and temporal dynamics of a global radiation and diversification in the killer whale. P. A. Morin et al. en *Molecular Ecology*, vol. 24, n.º 15, págs. 3964-3979, agosto de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Especiación cromosómica en primates. Arcadi Navarro en *IyC*, agosto de 2005.
Nuevo mecanismo de creación de especies. Gregory D. D. Hurst y Chris D. Jiggins en *IyC*, marzo de 2014.
La vertiginosa evolución de los cíclidos. Axel Meyer en *IyC*, marzo de 2016.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



El pliegoscopio: un microscopio por menos de un euro

Con ayuda del montaje adecuado, una pequeña bola de zafiro puede convertirse en un microscopio de excelentes prestaciones

Todos tenemos en mente la imagen de un microscopio ordinario: un instrumento bastante voluminoso, con su pie, su platina, su revólver de objetivos... y con un precio no inferior a algunas decenas de euros. Hace poco, el bioingeniero de Stanford Manu Prakash y dos colaboradores idearon un dispositivo que en pocos meses causó sensación: un microscopio de menos de un euro, que puede construirse recortando una hoja de cartón y que proporciona más de 1000 aumentos.

El aparato, cuyo principal componente es una bola de zafiro de menos de un milímetro de diámetro, es una versión moderna del primer microscopio, ideado a finales del siglo XVII por el comerciante y erudito holandés Antoni van Leeuwenhoek. Veamos en qué se basa su óptica.

Una lente convexa...

¿Qué hacemos para apreciar los detalles de un objeto? Lo acercamos lo más posible al ojo, a fin de aumentar el ángulo bajo el cual lo vemos. La distancia óptima es la menor a la que nuestro ojo puede adaptarse. Conocida como «punto próximo», suele ser de 25 centímetros (algo menos para los miopes), si bien aumenta con la edad. La resolución angular del ojo en el centro del campo visual es de un minuto de arco, por lo que no distinguiremos detalles de menos de 50 micrómetros.

Para mejorar esa resolución podemos servirnos de una lupa: una lente delgada de caras convexas. Suele utilizarse colocando el objeto en el plano focal, de modo que los rayos que la atraviesen emerjan paralelos y el ojo no tenga que adaptarse. En esta situación, lo que determina el ángulo bajo el cual se ve el objeto es la distancia entre este y la lupa; es decir, la distancia focal. El aumento viene dado por el cociente del punto próximo y dicha distancia.

Cuando se desea un campo de observación amplio, la lente debe ser grande y, por razones prácticas, de poca curvatura. Obtenemos así una lupa como las que usaba Sherlock Holmes. Con una distancia focal de cinco centímetros, conseguiremos 5 aumentos.

Ese modo de usar la lupa resulta cómodo porque no necesita que el ojo haga ningún esfuerzo. Sin embargo, no permite conseguir un aumento mucho mayor. Para observar detalles más finos habremos de recurrir, al igual que joyeros y relojeros, a un segundo procedimiento: acercar el ojo a la lupa lo máximo posible.

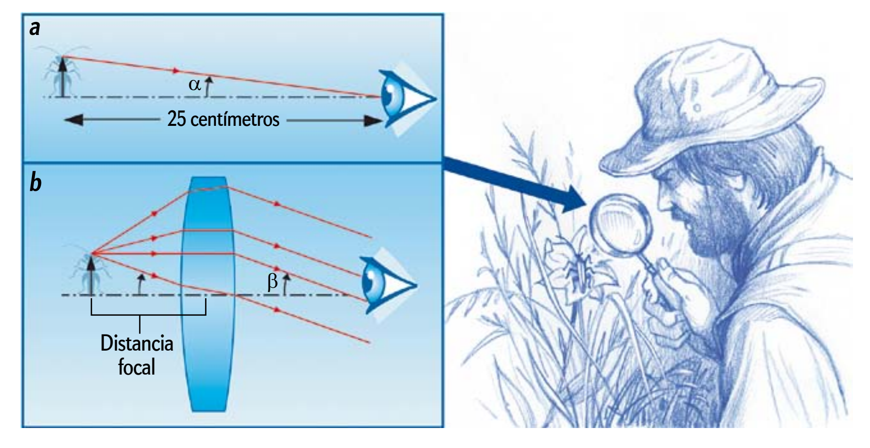
... y luego esférica

Con esta disposición, el aumento es equiparable al de la primera, pero el campo de observación será mayor. Sacrificando este último, podremos conseguir más aumentos. ¿Cómo? Incrementando en la medida de lo posible la curvatura de la lente, ya que así reduciremos la distancia focal.

Una solución pasa por emplear una lente esférica: una bola de vidrio. Sin embargo, cuando iluminamos una esfera con rayos paralelos, estos no convergen en un solo punto, sino que se esparcen a lo largo de un segmento. Dicho efecto, llamado «aberración esférica», está causado por los rayos más alejados del eje óptico, el que pasa por el centro de la bola.

Con un pequeño diafragma podremos eliminar esos rayos y, por tanto, también la aberración esférica. Sin embargo, este método disminuirá la luminosidad y el campo de visión.

Una solución más ingeniosa se la debemos a Henry Coddington, óptico inglés del siglo XIX que dejaría su nombre a un tipo de lupa. Esta se obtiene eliminando parcialmente el vidrio de la esfera y dejando solo un pequeño cilindro central (*véase la figura de la derecha*). Dado que la distancia focal de una esfera de vidrio ordinario es 1,5 veces el radio, una bola de unos dos o tres centímetros de diáme-



A SIMPLE VISTA, la mínima distancia a la que puede observarse un objeto sin demasiado esfuerzo es de unos 25 centímetros (*a*). Con una lupa, el objeto suele colocarse en el foco de la lente, lo que magnifica el ángulo de visión (*b*). El aumento de la lente viene dado por el cociente β/α de los ángulos de visión.

BRUNO VACARO

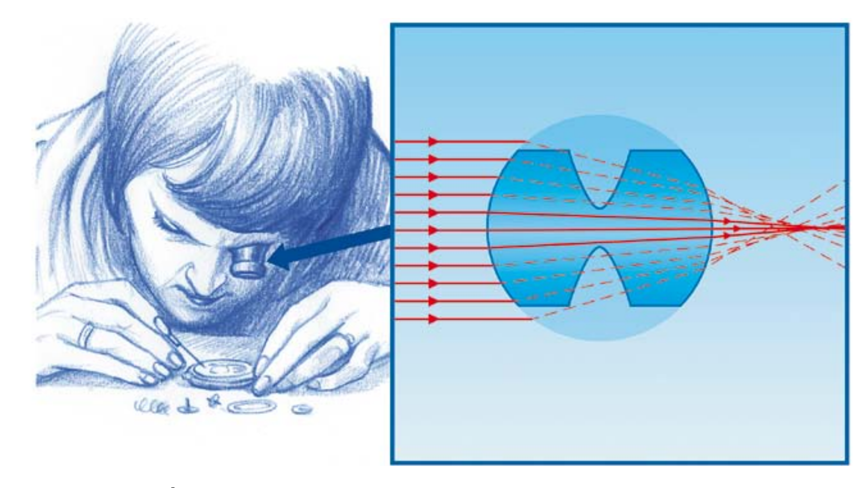
tro nos permitirá conseguir entre 10 y 20 aumentos.

Más de mil aumentos

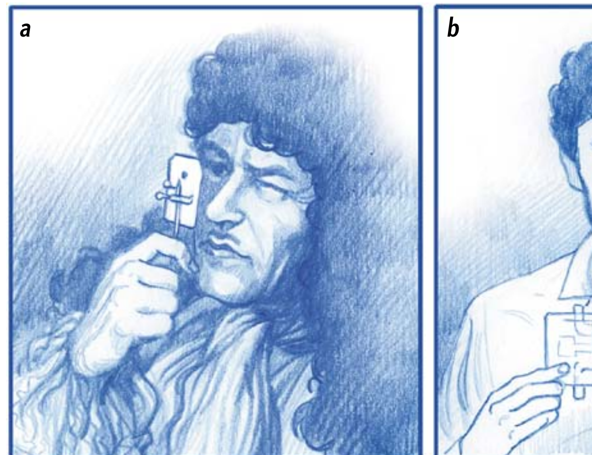
Con todo, semejantes valores siguen quedando lejos de lo que nos ofrece un microscopio. ¿Y si redujésemos el diámetro de la bola a menos de un milímetro para llegar a los 300 aumentos? Eso fue lo que logró Leeuwenhoek. Su maestría en el trabajo del vidrio le permitió lograr bolas de excelente calidad, probablemente gracias a la técnica de la gota fundida (fundir la punta de un hilo fino de vidrio y obtener una gota perfectamente esférica aprovechando la tensión superficial del líquido).

La segunda proeza de Leeuwenhoek fue construir un dispositivo mecánico para colocar la muestra y situarla a una distancia igual o inferior a la focal; es decir, una fracción de milímetro. En su microscopio, la bola, engastada en una lámina metálica, permanece inmóvil, mientras que la muestra se fija a la cabeza de un alfiler que se desplaza mediante dos tornillos. Basta entonces con arrimar el instrumento al ojo y ponerlo de cara a la luz. Gracias a este microscopio tosco pero de prestaciones inigualadas durante decenios, Leeuwenhoek descubrió un universo de vida microscópica.

En los laboratorios, el microscopio de bolas de vidrio acabaría siendo suplantado por instrumentos mejores, aunque también más complejos. Sin embargo, dada su simplicidad y robustez, el invento de Leeuwenhoek sigue vivo entre los aficionados a la ciencia. También se ha beneficiado de los avances técnicos: hoy, una bola de zafiro con un índice de refracción de 1,8 y 0,3 milímetros de diámetro permite rozar los 1500 aumentos.



UNA LENTE ESFÉRICA permite obtener un aumento considerable, si bien la imagen se ve afectada por la aberración esférica. Esta se produce porque los rayos luminosos que inciden paralelos no convergen en un mismo punto. Tal defecto puede corregirse ahuecando parcialmente la lente, de modo que solo la atraviesen los rayos más cercanos al eje, para los cuales el punto focal se encuentra muy bien definido.





EL PRIMER MICROSCOPIO de Leeuwenhoek (*a*) y el pliegoscopio inventado hace poco por el bioingeniero de Stanford Manu Prakash (*b*) comparten una característica: su elemento óptico es en ambos casos una diminuta bola, de vidrio en el primero y de zafiro en el segundo. El pliegoscopio consta de un montaje de cartón en el que varias lengüetas permiten colocar con precisión el elemento óptico y la iluminación (un led) con respecto a la muestra.

Prakash necesitó una buena dosis de inventiva para construir un sistema adecuado para colocar la muestra y enfocarla. En su «pliegoscopio» (*foldscope* en inglés), la bola está integrada en un montaje de papiroflexia hecho con cartón de 0,35 milímetros de espesor. El dispositivo permite situar con precisión la muestra (colocada sobre la lámina portaobjetos de un microscopio clásico) y, jugando con la flexión del papel, asegurar el enfoque a una distancia de tan solo 0,025 milímetros.

El pliegoscopio consta de tres niveles que se desplazan finamente unos con respecto a otros accionando unas lengüetas. En el inferior se encuentra la muestra. Delante de él (con respecto al observador) se halla el nivel óptico, al que está sujeta la bola de vidrio, y detrás, el de iluminación, con un simple led alimentado por una pila de botón. El conjunto pesa unos 9 gramos y cuesta menos de un euro (aunque sobre la base de 10.000 ejemplares), siendo la bola el componente más caro. Con la esfera de zafiro que mencionábamos más arriba, la resolución alcanza una fracción de micrómetro.

Cabe señalar que, aunque los planos del pliegoscopio se encuentran a disposición de todos, su construcción exige una destreza y unas técnicas de experimentación bastante depuradas. Con todo, la invención de Prakash constituye una alternativa interesante a las promesas de corte más tecnológico que prometen transformar nuestros teléfonos móviles en microscopios, y ha sido considerada por la ayuda que podría prestar en los países pobres para detectar enfermedades infecciosas. IyC

PARA SABER MÁS

Foldscope: Origami-based paper microscope. James S. Cybulski, James Clements y Manu Prakash en *PLOS ONE*, vol. 9, n.º 6, e98781, junio de 2014. Artículo de acceso abierto disponible en **journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0098781**

Óptica. Eugene Hecht. Addison Wesley, 2009.

BRUNO VACARO

por Bartolo Luque



Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.

El principio de máxima entropía

Edwin Jaynes y su interpretación epistemológica de la mecánica estadística

Muy a menudo, resolver un problema de probabilidad nos exige asignar probabilidades a priori; es decir, antes de comenzar a calcular nada. En el lanzamiento de un dado, por ejemplo, asignamos a cada cara una probabilidad a priori de 1/6. ¿Por qué? Estamos suponiendo que el dado no está trucado y que la simetría cúbica hace indistinguibles las caras más allá de sus etiquetas. Es decir, carecemos de razones para suponer que uno de los números tenga más o menos probabilidades de aparecer que otro. Así que, en cierto modo, las probabilidades a priori representan nuestro estado de conocimiento, o nuestro grado de ignorancia, antes de observar los datos.

Acabamos de aplicar el «principio de indiferencia», así bautizado en los años veinte del pasado siglo por el economista John Maynard Keynes. Este nos dice que, cuando hay varios eventos posibles y no hay razón para primar ninguno frente a otro, hemos de asignar la misma probabilidad a todos ellos. Conocido también como «principio de la razón insuficiente», ha sido motivo de discusión desde los albores de la teoría de la probabilidad. Aparece ya en el *Ars conjectandi* de Jacob Bernoulli, de 1713, o en la *Théorie analytique des probabilités* de Laplace, de 1812. El principio desprende cierto aroma metafísico, pues lidia con lo que parece ser un grado de conocimiento subjetivo: en la ignorancia, nos dice, cuando ninguna razón favorece un evento frente a los demás, asignaremos a todos ellos idéntica probabilidad. ¿Podemos justificar su uso?



IVANNIKULIN/ISTOCKPHOTO

Dados tendenciosos

Supongamos que alguien ha lanzado nuestro dado un número muy grande de veces, n, y nos dice que la puntuación promedio ha sido de 4,5. Antes de disponer de esta información, habíamos supuesto que p_i, la probabilidad de obtener el número i, era 1/6, por lo que esperábamos una puntuación promedio de $(1 + 2 + \cdots + 6)/6 = 3{,}5$. ¿Cómo trasladar nuestro conocimiento actual sobre el promedio a una nueva asignación de probabilidades para las caras?

Observemos que, si el promedio fuera muy cercano a 1, la probabilidad p_1 debería ser mucho más elevada que el resto: una media así solo puede darse si el 1 aparece en la mayor parte de los lanzamientos. Podríamos razonar de manera similar si el promedio fuera muy cercano a 6. En tal caso, asignaríamos una probabilidad muy alta al 6 y muy baja al resto. Así pues, el sentido común nos dice que, si el dado proporciona una media superior a 3,5, es porque los números altos aparecen con mayor frecuencia que los bajos, y viceversa. Sin embargo, hay una infinidad de distribuciones de probabilidad cuya media es 4,5. ¿Con cuál nos quedamos? ¿Podemos aplicar el principio de la razón insuficiente?

Si llamamos n_i al número de veces que aparece la puntuación i en una secuencia de n tiradas, tendremos que $n = n_1 + n_2 + \cdots + n_6$. Una vez fijado un «macroestado», es decir, una distribución de resultados del tipo $(n_1, n_2, ..., n_6)$, el número W de «microestados» posibles, o secuencias distintas con n_1 unos, n_2 doses, etcétera, vendrá dado por:

$$W(n_1, n_2, ..., n_6) = \frac{n!}{n_1!\, n_2! \cdots n_6!}$$

(*véase el recuadro* «Permutaciones con repetición»). Si n es muy grande, podemos usar una aproximación tosca de Stirling y tomar $n! \approx (n/e)^n$. Ahora el lector podrá comprobar con facilidad que:

$$W(n_1, n_2, ..., n_6) \approx \exp\left(\sum_{i=1}^{6} n_i \log\left(\frac{n}{n_i}\right)\right).$$

En general, el valor de la media restringirá los posibles macroestados (n_1, n_2, ..., n_6), pero aun así seguiremos teniendo una cantidad enorme de posibilidades. ¿Con cuál quedarnos? La respuesta es simple: con el macroestado que presente la mayor cantidad de microestados compatibles con él, ya que ese será el que cuente con mayores probabilidades de aparecer en una secuencia de n tiradas. Nótese que aquí estamos aplicando una vez más el principio de indiferencia, pues estamos asignando la misma probabilidad a todos los microestados compatibles con nuestra restricción.

Así pues, el macroestado que maximice el valor de la función $W(n_1, n_2, ..., n_6)$ con las condiciones $n = n_1 + n_2 + \cdots + n_6$ y $(n_1 + 2n_2 + \cdots + 6n_6)/n = 4{,}5$ nos dará la distribución que buscamos. Una de las herramientas más socorridas en estos casos es el método de los multiplicadores de Lagrange, que en este caso resulta sencillo de aplicar. Haciendo $p_i = n_i/n$, obtenemos como solución $p_1 = 0{,}05435$, $p_2 = 0{,}07877$, $p_3 = 0{,}11416$, $p_4 = 0{,}16545$, $p_5 = 0{,}23977$ y $p_6 = 0{,}34749$. Tal y como esperábamos, una distribución sesgada hacia los valores altos.

Por desgracia, no siempre es tan sencillo calcular las posibles configuraciones W de nuestro problema. De hecho, en la mayoría de los casos de interés resultará imposible. ¿Entonces?

La expresión que realmente hemos maximizado en el cálculo anterior es el argumento de la exponencial. Salvo un prefactor irrelevante, este puede reescribirse como:

$$-\sum_{i=1}^{6} p_i \log p_i \,.$$

¡La famosa entropía de Shannon! ¿Se trata de una casualidad o de una pista que deberíamos seguir?

PERMUTACIONES CON REPETICIÓN

Para obtener el número de secuencias posibles en n tiradas de un dado, debemos explicar primero cómo se calculan las permutaciones con repetición. A fin de ilustrar el problema, consideremos la siguiente pregunta: ¿cuántas palabras distintas (con o sin sentido) podemos construir utilizando todas las letras de MISSISSIPPI? Si todas las letras fuesen diferentes, estaríamos ante una permutación estándar, por lo que el resultado sería 11!. Sin embargo, en nuestro caso se repiten algunos elementos: las letras I y S aparecen cuatro veces cada una, y la P, dos.

Deseamos «rellenar» 11 posiciones. Comencemos por la letra I. Debemos colocar 4 de ellas y, puesto que son indistinguibles, tenemos $\binom{11}{4}$ maneras de hacerlo (el número de grupos que podemos formar con 4 casillas de un total de 11). Una vez emplazadas todas las I, pasemos a las S. De nuevo tenemos 4 elementos, pero ahora solo disponemos de 11 − 4 = 7 posiciones vacías, por lo que podemos colocarlas de $\binom{7}{4}$ formas. En cuanto a la P, hay dos elementos para los cuales ahora nos quedan 3 posiciones vacantes; es decir, $\binom{3}{2}$ posibilidades. Por último, la M solo puede acabar en la casilla que falta. Así pues, tendremos:

$$\binom{11}{4}\binom{7}{4}\binom{3}{2}\binom{1}{1} = 34.650$$

palabras posibles.

La generalización de nuestro ejemplo es inmediata y dice: sean n objetos (en nuestro caso, número total de letras) que pueden dividirse en r clases (número de letras distintas) con n_i objetos idénticos (veces que aparece cada letra) en cada clase ($i = 1, 2, ... r$; es decir, tal que $n_1 + n_2 + ... n_r = n$); el número de permutaciones con repetición posibles es:

$$PR_n\,(n_1, n_2, ..., n_r) = \frac{n!}{n_1!\, n_2! \cdots n_r!} \,.$$

Como puede ver el lector, el cálculo que acabamos de efectuar es directamente aplicable al caso del dado.

Entropía, información y sorpresa

La teoría de la información fue desarrollada por Claude Shannon hacia finales de los años cuarenta del pasado siglo para estudiar la transmisión de señales con ruido. El concepto clave de la teoría es, claro está, el de información, una noción que cuantifica la «sorpresa» asociada con la ganancia de conocimiento.

En el caso del dado, si la probabilidad de obtener el resultado i es p_i, definiremos la ganancia de información asociada a observar el número i como $I_i = -\log p_i$. Este valor aumenta a medida que p_i disminuye. Algo muy lógico: si un resultado es muy probable, aprenderemos muy poco cada vez que ocurra. Y dado que los eventos raros nos resultan más sorprendentes, también podemos decir que I_i mide la sorpresa que supone observar el valor i. A mayor sorpresa, más información.

Interpretada la información de esta manera, la entropía de Shannon:

$$S = -\sum_{i=1}^{r} p_i \log p_i = \sum_{i=1}^{r} p_i I_i$$

(donde r generaliza el número de resultados posibles) es simplemente el valor esperado de la información, o de la sorpresa. Esta entropía alcanza su valor mínimo, $S_{\text{mín}} = 0$, si $p_i = 1$ para algún suceso y 0 para el resto. En tal caso, nos encontraríamos frente a una distribución que no causa sorpresa alguna: siempre sucede lo mismo. ¿Y su máximo? Pues vale $S_{\text{máx}} = \log r$ y se alcanza para la distribución equiprobable: $p_i = 1/r$. ¡La misma distribución que el principio de indiferencia asignaba a nuestro dado inicial!

Así pues, el principio de indiferencia equivale a decir que la distribución de probabilidad a priori ha de ser aquella que maximiza la entropía de Shannon. ¿Por qué?

La distribución menos sesgada es aquella para la cual la «desinformación» es máxima. En cierto modo, toda asignación de probabilidades supone la afirmación de algún conocimiento/desconocimiento. Si consideramos la entropía como una medida de la información, entonces deberíamos elegir la distribución de probabilidad que incluye solo la información proporcionada a priori en nuestro problema. En otras palabras, podríamos elegir otras distribuciones, pero la que maximiza la entropía es la menos informativa o, como dicen algunos, la más honesta con respecto a nuestra ignorancia.

Cómo obtener algo a cambio de nada

Fue el físico Edwin Thompson Jaynes quien, en 1957, propuso esta manera de asignar probabilidades a priori, a la que llamó «principio de máxima entropía», o MaxEnt para los amigos. En palabras del propio Jaynes, la máxima entropía nos proporciona «la estimación menos sesgada posible sobre la información dada; es decir, la menos comprometida con respecto a la información que falta». Nótese que, a pesar de su nombre, MaxEnt no parte de las leyes de la termodinámica, sino de la noción de entropía que aparece en la teoría de la información y de nuestra capacidad para hacer inferencias a partir de los datos disponibles.

Si carecemos de información alguna, MaxEnt nos dice que elijamos como distribución a priori aquella que maximiza la incertidumbre, o la entropía, y que impongamos como única restricción la normalización de la probabilidad:

$$p_1 + p_2 + \cdots + p_r = 1 \,.$$

En el lenguaje de los multiplicadores de Lagrange, esto implica maximizar el lagrangiano:

$$L(\{p_i\}) = S(\{p_i\}) - \alpha \left(\sum_{i=1}^{r} p_i - 1 \right),$$

donde α es un multiplicador de Lagrange. Este cálculo que nos lleva a la distribución de probabilidad uniforme: $p_i = 1/r$. Así pues, el principio de indiferencia, o de la razón insuficiente, puede entenderse ahora como un caso particular del principio de máxima entropía.

Si disponemos de más información, como puede ser el valor esperado $\langle i \rangle$ de la distribución, podemos incorporar esta nueva restricción a nuestro lagrangiano:

$$L(\{p_i\}) = S(\{p_i\}) - \alpha \left(\sum_{i=1}^{r} p_i - 1 \right) - \beta \left(\sum_{i=1}^{r} i p_i - \langle i \rangle \right).$$

Al maximizarlo, obtenemos como solución:

$$p_i = \frac{\exp(-\beta i)}{Z(\beta)} \,,$$

donde:

$$Z(\beta) = \sum_{i=1}^{r} \exp(-\beta i) \,,$$

y el multiplicador β se escoge de manera que se satisfaga la restricción del valor esperado. Justamente, lo que hicimos para resolver el caso de nuestro dado con promedio igual a 4,5.

La función $Z(\beta)$ que hemos definido aquí le resultará familiar a cualquiera que conozca los rudimentos de la mecánica estadística: se trata de la famosa función de partición. De hecho, al resolver nuestro problema del dado con la restricción del valor medio, empleamos un razonamiento debido a uno de los padres de la física estadística: Ludwig Eduard Boltzmann. Así que el principio de máxima entropía ya se encontraba implícito en aquellos trabajos pioneros.

Jaynes propuso su principio de máxima entropía como base sobre la que desarrollar la mecánica estadística. Lo sorprendente de este enfoque es que nos permite hacer predicciones no triviales sobre un sistema dinámico obviando por completo su dinámica. Asombrosamente, el principio de máxima entropía nos enseña cómo explotar nuestra ignorancia para alcanzar predicciones correctas en apenas unas líneas de cálculo; nos muestra cómo obtener algo a cambio de nada. IyC

PARA SABER MÁS

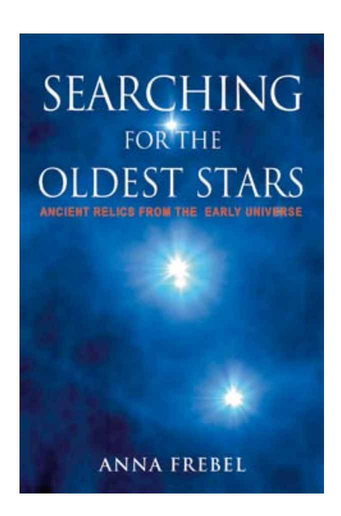
Where do we stand on maximum entropy? Edwin Thompson Jaynes en *The maximum entropy formalism*, dirigido por R. D. Levine y M. Tribus. The MIT Press, 1973.

Probability theory: The logic of science. Edwin Thompson Jaynes. Cambridge University Press, 2003.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Cuál es la mejor estrategia en un juego de preguntas sí/no? Juan M. R. Parrondo en *IyC*, agosto de 2001.

El geómetra de la información. Jérôme Segal en «La información», *Temas de IyC* n.º 36, 2004.



SEARCHING FOR THE OLDEST STARS
ANCIENT RELICS FROM THE EARLY UNIVERSE
Anna Frebel
Princeton University Press, 2015.

El universo en su origen

Formación de las primeras estrellas

Los astrónomos estudian las estrellas más antiguas del universo con el enfoque del arqueólogo que investiga los artefactos del pasado. Ambos rastrean orígenes. Queremos conocer la era primitiva, los primeros 1000 millones de años del universo. Mediante la identificación de estrellas muy antiguas, podemos conocer el universo en que se daban. Las estrellas conservan la composición química de la nube de gas que les dio origen. Esa es la auténtica información arqueológica que estamos excavando. No solo estamos descubriendo las estrellas, sino desenterrando también su composición, lo que nos facilita entender cómo era la composición química del universo primigenio.

Anna Frebel, profesora asociada del departamento de física del Instituto de Tecnología de Massachusetts, cuenta en su haber con el descubrimiento de varias de las estrellas más antiguas conocidas. Acompaña al lector hasta las profundidades del espacio y el tiempo y le presenta el estado de la cuestión de la arqueología estelar. Explica el método seguido en la excavación de sectores del firmamento nocturno en busca de reliquias estelares, sumamente raras, algunas de las cuales llevan brillando más de 13.000 millones de años. Una búsqueda que se torna apasionante cuando encontramos nuevos detalles sobre el comienzo del universo.

Las primeras estrellas se formaron poco después de la gran explosión y estallaron luego en forma de supernovas. Sus huellas químicas se incorporaron en las estrellas antiguas. Esas trazas nos aportan claves para el estudio del origen cósmico de los elementos y los procesos de formación estelar y galáctica, incluidos los que atañen a la Vía Láctea.

¿Cómo reconocer las estrellas más antiguas entre los miles de millones que parpadean en la noche? A simple vista, y observadas incluso desde telescopios potentes, todas parecen iguales. Pero hay una característica que delata a las estrellas antiguas: son deficientes en «metales», término empleado por los astrónomos para referirse a los elementos químicos más pesados que el helio. Las primeras generaciones de estrellas se condensaron a partir del gas primordial unos pocos cientos de millones de años después de la gran explosión. En ese momento, el universo constaba casi enteramente de hidrógeno (en torno a un 75 por ciento de su masa) y de helio (un 25 por ciento).

Esas estrellas primitivas crearon elementos más pesados a través de las reacciones nucleares de su interior y, al final de su vida, eyectaron esos elementos hacia el gas interestelar a partir del cual se formarían nuevas generaciones de estrellas. En el transcurso de los 13.700 millones de historia del universo, la concentración de elementos pesados de las posteriores generaciones estelares fue gradualmente aumentando. Fue en los hornos nucleares de las primeras estrellas donde se forjaron el carbono, el nitrógeno, el oxígeno y otros elementos esenciales para la vida.

Por consiguiente, la clave para identificar la presencia de estrellas antiguas, pobres en metales, es la espectroscopía, el análisis de la luz estelar que permite descubrir la signatura de los elementos químicos. Frebel estudia las estrellas que son deficientes en elementos clave, sobre todo en hierro. Reconocer rasgos espectrales tan sutiles entre miríadas de estrellas es como buscar una aguja en un pajar, en el que el pajar es el halo entero de la Vía Láctea. Uno de sus descubrimientos fue la estrella HE 1327-2326, cuya concentración en hierro era de solo 1/250.000 la concentración solar. La descubrió en 2005 y tenía una edad de 13.200 millones de años.

Para inferir la historia de la Vía Láctea y las piezas que la crearon resulta imprescindible conocer la edad de las estrellas y de los cúmulos estelares. ¿De dónde procede el halo de nuestra galaxia, de sí misma o de fragmentos de galaxias satélite capturadas? ¿Se formó el disco denso tras la constitución del halo o contemporáneamente? ¿Ha creado sin cesar estrellas el disco fino, donde se halla el Sol, o las ha generado de manera episódica? [*véase* «Los fósiles de la Vía Láctea», por Kathryn Johnston; Investigación y Ciencia, febrero de 2015]. Son muchas las cuestiones astronómicas cuya resolución depende de la posibilidad de establecer una edad fiable de las estrellas. Cuanto menor sea la concentración de metales, más cerca nos hallaremos de los comienzos.

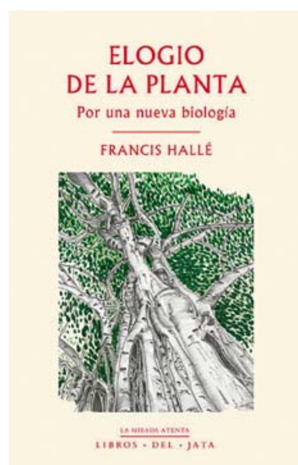
El estado físico de una estrella (su tamaño, temperatura y energía total liberada) queda determinado por su masa, composición química y edad. La edad importa porque, a medida que el astro va envejeciendo, las reacciones nucleares de su interior alteran la composición, produciendo cambios en la estructura general. Podemos medir directamente la masa de las estrellas que tienen compañeras y establecer, también directamente, la composición de la superficie de una estrella a través de un análisis cuidadoso de su espectro de emisión. Hay un caso en el que podemos medir la edad exacta: el Sol. En el laboratorio podemos analizar el material del sistema solar, lo que nos está vedado para cualquier otra estrella.

La edad del Sol sirve de análogo para profundizar en los pormenores de la física de otros interiores estelares. Mediante la calibración de modelos con relación al Sol, podemos conocer estrellas que poseen una masa mayor o menor. Nuestro conocimiento de la evolución de las estrellas se encuentra estrechamente asociado al estudio de los cúmulos estelares: grupos de entre cientos y miles de estrellas que se formaron juntas y, por ello, comparten composición y edad [*véase* «El misterio de los cúmulos globulares», por Antonella Nota y Corinne Charbonnel; Investigación y Ciencia, septiembre de 2016]. Algunas de las estrellas

más antiguas de nuestra galaxia tienen edades estimadas a partir de la desintegración del torio o del uranio. En estos casos, la edad derivada se refiere al tiempo de formación de los isótopos, no necesariamente al de la estrella; en cualquier caso, se desconoce la concentración inicial del elemento.

El libro no presenta ecuaciones ni bibliografía, pero a menudo se torna demasiado técnico para incluirlo en el género de la divulgación científica. Con todo, resulta amena la interrelación entre los episodios de la carrera de la autora y el progreso de la disciplina.

—Luis Alonso



ELOGIO DE LA PLANTA
POR UNA NUEVA BIOLOGÍA
Francis Hallé
Libros del Jata, 2016.

Las plantas, esas desconocidas

Una nueva manera de pensar en el mundo vegetal

Dado que las personas somos animales, para la mayoría de nosotros las plantas cumplen dos funciones: alimentarnos (a nosotros y a nuestros animales domésticos) y decorar nuestro entorno, tanto los espacios exteriores (parques, jardines, senderos de montaña) como los interiores (domicilios, oficinas). No solemos pararnos a pensar en que son seres vivos con una manera propia de adaptarse al ambiente: una caracterizada por el hecho de que no pueden huir de sus predadores ni de un clima adverso. Nuestra propia condición de animales influye tremendamente en la manera en que percibimos el mundo vegetal, incluso cuando lo estudiamos desde un punto de vista científico.

El profesor Hallé, botánico de la Universidad de Montpellier, nos ofrece en este libro una estupenda y amena comparación entre las plantas y los animales, reivindicando las primeras como seres muy diferentes de los segundos. El autor fue uno de los proponentes de los modelos arquitectónicos de crecimiento de los árboles, por lo que presenta la morfología de las plantas de una manera atractiva y dinámica.

A diferencia de los animales, las plantas crecen constantemente mientras viven, y mueren si de alguna manera se impide ese crecimiento. Ni este y ni su desarrollo están centralizados, como sucede en los animales; en su lugar, la planta se comporta como una colonia o serie repetitiva de módulos siempre iguales. Ese carácter de colonia lleva al autor a cuestionar la idoneidad de aplicar a las plantas el concepto animal de individuo (es decir, «que no puede dividirse»), ya que la mayoría de ellas son capaces de regenerar el organismo entero a partir de un fragmento [*véase* «Células madre vegetales», por Crisanto Gutiérrez; Investigación y Ciencia, agosto de 2012]. ¿Son estas plantas regeneradas la misma que la original? ¿Son los clones de plantas, que a menudo ocupan grandes extensiones de terreno, un único individuo?

Ese modo de vida sésil, fijado al suelo, es en definitiva el que les ha llevado a desarrollar, a lo largo de los millones de años que llevan sobre la Tierra, unos recursos propios que les permiten alcanzar longevidades de miles de años. Esto tal vez sorprenda a algunos lectores, pues la mayoría estamos familiarizados con plantas anuales o bianuales, que en realidad solo constituyen una minoría en el reino vegetal. Recientemente se ha identificado una cepa de *Picea abies* datada con carbono 14 en 9500 años: aunque la parte aérea muera, el pie sigue vivo y vuelve a crecer.

Las plantas son «unas virtuosas de la bioquímica», ya que no pueden escapar cuando se acerca un predador. En este sentido, resulta refrescante leer el ameno resumen del increíblemente diverso —y mal llamado— «metabolismo secundario», que en realidad resulta fundamental para su supervivencia anclada al suelo.

Podemos decir que las plantas muestran una cierta «solidaridad» con los animales, ya que hasta cierto punto nos permiten que nos alimentemos de ellas. Con todo, el reino vegetal no apareció en la Tierra para servir de sustento a los animales, por más que esto nos parezca «natural». ¿Cómo se las arreglan las plantas para «dejarse comer en parte» sin morir? Entre sus estrategias de vida, han sabido sacar partido a la movilidad a corto plazo de los animales para dispersarse por el planeta. Los diferentes ejemplos de la relación entre animales y plantas llevan al autor a preguntarse si, en el fondo, no es el animal el que está manipulado por la planta.

La plasticidad y fluidez del genoma vegetal contrasta con la estabilidad del genoma animal. Las células de las distintas partes de una misma planta pueden tener genes muy diferentes, incluso distinto número de cromosomas. Mutaciones somáticas que matarían a un animal a la planta no solo no le afectan, sino que le proporcionan un importante mecanismo de generación de diversidad genética para adaptarse a circunstancias adversas del entorno. Como resultado de esa plasticidad genómica, la filogenia de las plantas es mucho más reticulada que la de los animales, definida como direccional. El autor, experto en ecología de los bosques tropicales, empleó una balsa transportada por un dirigible para poder alcanzar las copas de los árboles y estudiar desde allí la variabilidad génica intraárbol.

Uno de los capítulos del libro está dedicado a la comparación entre plantas y corales, animales coloniales que también viven fijos al suelo. El autor destaca las semejanzas entre los corales constructores de arrecifes y los árboles, y contrasta las diferencias entre aquellos y los animales de vida libre. Ese análisis le permite resumir las características de la vida sésil: una vida marcada por la colonialidad, ya se trate de arrecifes de coral o de bosques, si bien admite que es posible que otros seres vivos que también viven fijos (vorticelas, laminarias, cochinillas, etcétera) no compartan todos esos rasgos.

Algunas de las observaciones que aparecen en la obra resultarán conocidas para los especialistas en las diferentes áreas de la biología vegetal. Es la comparación con la biología de los animales, sobre todo con la de los vertebrados, lo que nos da esa nueva visión de conjunto que constituye la gran aportación de Hallé. No solo para el público no especializado, sino también para numerosos especialistas.

Los excelentes 99 dibujos del autor ilustran con claridad las explicaciones del texto, lo que facilita en todo momento su comprensión. *Elogio de la planta* está escrito con rigor científico, en un lenguaje asequible para el gran público y con abundante bibliografía para quienes deseen profundizar. Por último, se trata de una edición muy cuidada, con una inmejorable traducción —la primera— al español. Después de leerlo, amable lectora o lector, su próximo paseo por el jardín, el parque, o el campo será mucho más agradable e interesante, y admirará a esos seres vivos excepcionales que hasta ahora solo eran «el fondo del paisaje».

—Mertxe de Renobales Scheifler
Facultad de farmacia
Universidad del País Vasco

NOVEDADES



LA AVENTURA DE LA VIDA
LA HISTORIA DE LA EVOLUCIÓN HUMANA
Eudald Carbonell
Ilustrado por Pilarín Bayés
Para niños a partir de 8 años
la Galera, 2016
ISBN: 978-84-246-5688-1
92 págs. (21,95 €)



LAS MUJERES DE LA LUNA
Daniel Roberto Altschuler
y Fernando J. Ballesteros
Prólogo de José Manuel Sánchez Ron
Next Door Publishers
y Jot Down Books, 2016
ISBN: 978-84-944435-4-1
376 págs. (18,50 €)

MONTAÑAS
EL DESCUBRIMIENTO DE CÓMO SE FORMAN
Luis Carcavilla Urquí
Instituto Geológico y Minero de España y Libros La Catarata, 2016
ISBN: 978-84-9097-218-2
160 págs. (15 €)



HIPERESPACIO
UNA ODISEA CIENTÍFICA A TRAVÉS DE UNIVERSOS PARALELOS, DISTORSIONES DEL TIEMPO Y LA DÉCIMA DIMENSIÓN
Michio Kaku
Crítica, 2016
ISBN: 978-84-16771-19-6
528 págs. (20,90 €)



Recopilación de Daniel C. Schlenoff

Enero 1967

La detección de mentiras en el mercado

«En los últimos años, los métodos de detección de mentiras y el mismo polígrafo han sido sometidos a una revisión a fondo y cada vez más crítica. Aunque el polígrafo se desarrolló como ayuda a la labor policial, ya hace tiempo que la iniciativa de los profesionales halló nuevas aplicaciones al instrumento, y más o menos desde 1950 está firmemente asentado en la industria y en los ámbitos del Gobierno. Son unas 500 las firmas comerciales de poligrafía. Muchas compañías contratan a expertos en ella no solo para investigar pérdidas específicas, sino también para tratar de identificar a los aspirantes a puestos de trabajo con antecedentes criminales, los alcohólicos, los homosexuales o aquellos que podrían mostrarse desleales a la empresa. Fuera del Gobierno federal, el uso del polígrafo sigue en gran medida incontrolado. Hasta ahora, solo Illinois, Kentucky y Nuevo México han adoptado leyes que requieren operadores de polígrafo autorizados.»



Agricultura asfáltica

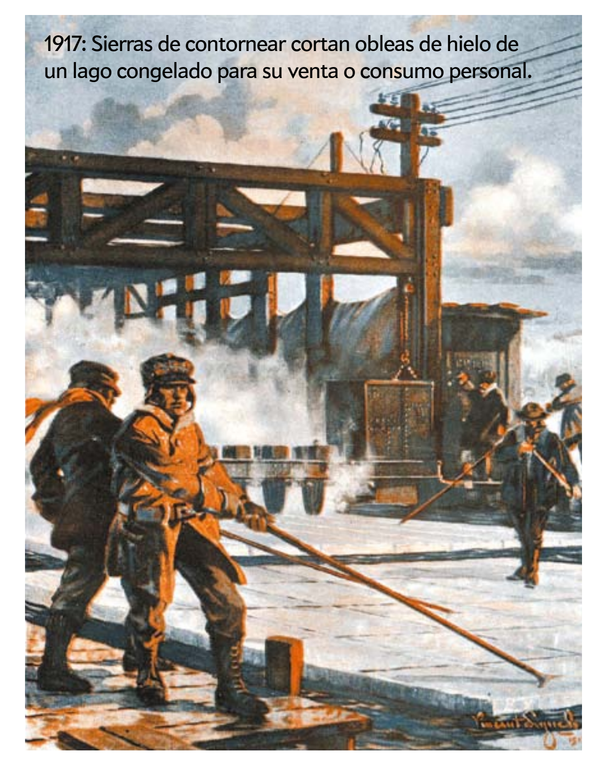
«En un ingenioso esfuerzo para valorizar tierras infraproductivas, se están empleando productos del petróleo. En Libia, la Esso Research and Engineering Company acometió en 1961 la estabilización de cincuenta hectáreas de dunas rociándolas con crudo de baja calidad. En esas dunas no suele arraigar ni siquiera la vegetación propia del desierto, pero la empresa anuncia que el 80 por ciento de las plantas de semillero de eucalipto y acacia que había plantado en ellas han sobrevivido y ya son árboles de una altura media de 7,5 metros. El Gobierno libio ha contratado la estabilización de 1200 hectáreas más, acción que finalmente podría desembocar en la creación de un bosque nacional en un país desértico carente de árboles.»



Enero 1917

El lapso de atención

«¿A qué se debe que las películas de cine sean tan populares? ¿Cómo logran competir, codo con codo, con nuestras mejores obras teatrales? Es ciertamente difícil retener la atención de un público de ciudad durante los tres actos de un drama cuando la trama puede adivinarse en el primer acto. La modernidad reclama acciones abreviadas, y las obras cinematográficas son historias narradas de forma más o menos sinóptica. El argumento se despliega en el menor tiempo posible. Así pues, si una obra escénica requiere tres horas, en la pantalla las imágenes la narran en una hora, y con la misma eficacia. La única excepción se halla en las obras cuyo éxito depende de ingeniosos juegos de diálogo.»



1917: Sierras de contornear cortan obleas de hielo de un lago congelado para su venta o consumo personal.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXVI, N.º 3, 20 DE ENERO DE 1917

Automóviles

«En el año recién terminado, EE.UU. ha producido más automóviles, tanto de pasajeros como comerciales, que durante cualquier otro período igual del pasado. El desarrollo de la mecánica del automóvil ha llegado a ese punto en que la mayoría de los vehículos incorporan los mismos principios esenciales. No importa si el motor es de seis o de doce cilindros o si el vehículo se vende por 500 o por 5000 dólares, porque las dimensiones de las partes y los mejores materiales para cada componente se conocen ya tan a fondo que, incluso en los autos más económicos, no se han identificado casi averías de motor ni de chasis a causa de fallos de diseño.»

Cosecha de hielo

«Una gran parte del hielo que al año se consume en este país nos viene de distancias de millas o de centenares de millas, de la superficie de algunos lagos de aguas mansas. Durante el invierno la recogida de hielo proporciona trabajo a todo un ejército de hombres, y si bien el tiempo frío inactiva muchas industrias y puestos de trabajo en los distritos rurales de nuestros estados norteños, también es cierto que la recogida de hielo brinda una lucrativa ocupación a los deseosos de trabajar.»



Enero 1867

La edad de las perforaciones

«La excavación de túneles de ferrocarril se está llevando a extremos sin límites. Incluso cuando un rodeo podría evitar una perforación, los ingenieros parecen hallar una singular gratificación en taladrar la tierra. Aparte del orgullo por la terminación de un gran trabajo, ¿no es posible que la clave del actual furor por los túneles esté en la fascinación de hurgar en lo misterioso y desconocido?»



INFORME ESPECIAL: INNOVACIÓN

Ideas que cambian el mundo 2016

VV.AA.

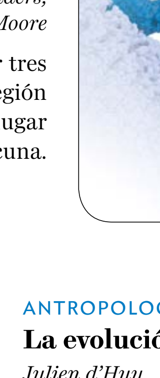
Diez grandes avances con el potencial para resolver problemas y mejorar nuestras vidas.

SIDA

El talón de Aquiles del VIH

Rogier W. Sanders, Ian A. Wilson y John P. Moore

Una proteína formada por tres componentes y que remeda a una región clave del VIH podría dar lugar a la tan esperada vacuna.



ANTROPOLOGÍA

La evolución de los mitos

Julien d'Huy

El análisis de los cambios que sufren los relatos al transmitirse de generación en generación arroja luz sobre la historia de las migraciones humanas desde el Paleolítico.

FÍSICA

La observación de ondas gravitacionales con LIGO

Alicia M. Sintes y Borja Sorazu

Hace un año se anunció un hito histórico: la primera detección directa de las «arrugas» del espaciotiempo predichas por la teoría de Einstein. ¿Qué avances técnicos lo hicieron posible?

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Clara Moskowitz, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
PUBLISHER AND VICE PRESIDENT Jeremy A. Abbate

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes, Cinco cosas que sabemos ciertas, Muchas formas de innovar y Muchos planetas, no demasiada vida*; Andrés Martínez: *Apuntes y La especiación de la orca común*; Juan Pedro Adrados: *Apuntes*; Fabio Teixidó: *Refugiados en su país y Salvar la biodiversidad de Birmania*; Alfredo Marcos: *Pluralismo integrador*; Miguel Ángel Vázquez Mozo: *La gravedad cuántica, camino de convertirse en ciencia*; Juan Manuel González Mañas: *Órganos humanos fabricados dentro de animales*; José Óscar Hernández Sendín: *La fusión alternativa*; Marco Rios Schmid: *Hacia una nueva visión del lenguaje*; J. Vilardell: *El pliegoscopio: un microscopio por menos de un euro y Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España